

المركز العربي
للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

الدكتور المهندس
مطاوع الأشهب

هندسة
المفاعلات النوويّة

الجزء الأول

بناء الاحتواء
حاوي الضغط
بناء العنفة
العنفة
مضخة
تبريد المفاعل
برج
التبريد
مكثف
قلب
المفاعل
مولد
البخار
مضخة التغذية
مضخة
جريان الماء
حوض
التجميع

مفاعل الطاقة ذو الماء المضغوط (PWR)

1991
دمشق - ج.ع.س



المركز العربي
للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

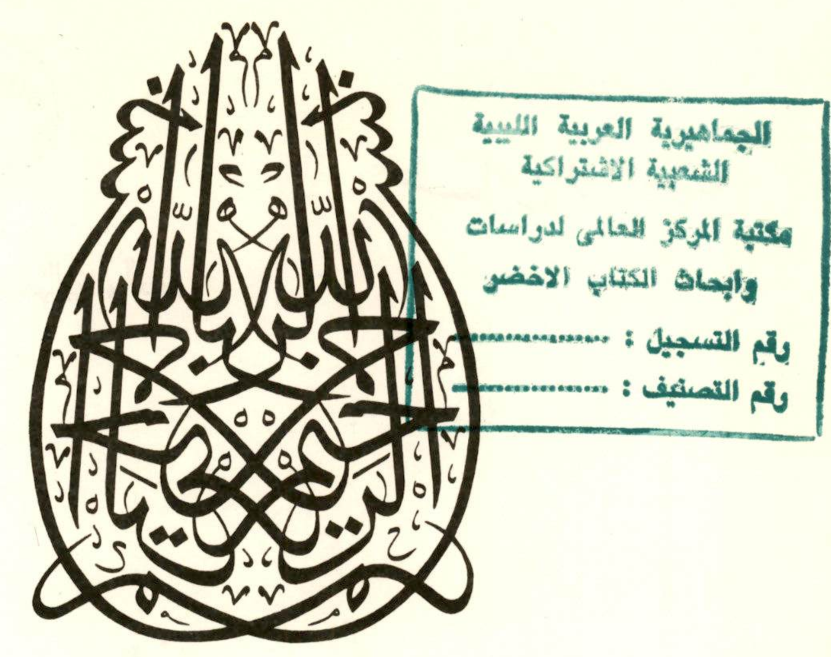
الدكتور المهندس
مطاوع الأشهب

كلود شيفر

عبد أبو يوسف الكويتي

هندسة المفاعلات النووية

الجزء الأول



هندسة المفاعلات النووية/ الجزء الاول - الطبعة الأولى
المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر
دمشق ص.ب 3752 ج.ع.س
ع 1.1.1991

الطبعة الأولى 1991م

محمد يوسف الكويتي

تقـــديم

بقلم: الاستاذ الدكتور المهندس

أحمد عمر يوسف

تتنامى بشكل مطرد حاجة المجتمع العربي للطاقة بكافة أنواعها. وتأتي الطاقة الكهربائية في المقدمة، فهي العصب الحساس للصناعة والزراعة والحياة اليومية للانسان على امتداد الوطن العربي بمختلف مستوياته الاجتماعية والمادية.

ومما يؤسف له حقا أن بلادنا العربية ما تزال حتى اليوم تعتمد على الوقود التقليدي المتمثل بالمشتقات النفطية (النفط الخام، الفيول، والغاز في بعض الاحيان)، في الوقت الذي تؤكد فيه التطبيقات العلمية والدراسات الاقتصادية ان النفط ثروة ثمينة ونافذة، ومن غير الإنصاف هدرها حرقا لانتاج الطاقة الكهربائية.

ان معظم الدول المتقدمة وبعض الدول التي تتجه نحو النمو قد لجأت على الرغم من أن العديد منها منتجة للنفط الى توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة النووية. ويكفي في هذا الصدد أن نثبت الحقائق التالية:

بلغ انتاج فرنسا من التوليد الكهرونووي في عام 1990، ‎.⁄.75 من انتاجها الكلي للطاقة الكهربائية، وبلجيكا أكثر من ‎.⁄.60 وكل من هنغاريا وكوريا الجنوبية أكثر من ‎.⁄.50.

وبلغة الارقام، وهي اللغة المقبولة والمفهومة في مثل هذه الموضوعات فان كلفة الكهرباء المولدة من الطاقة النووية تعادل ‎.⁄.60 من كلفة الطاقة المولدة من مادة الفحم، وحوالي ‎.⁄.40 من كلفة الطاقة المولدة من المشتقات النفطية!

يضاف الى ذلك عامل هام جدا يرجح كفة اللجوء الى التوليد الكهرونووي، ويتمثل في المحافظة على البيئة، ذلك ان حرق النفط والخام يؤدي الى تلوث البيئة، ليس على المستوى المحلي فحسب، بل على المستوى الكوني.

وتتجلى أهمية هذا العامل بوجه خاص في الدول العربية التي تعاني من مشاكل بيئية خطيرة.

ان التوليد الكهرونووي في الاقطار العربية أصبح حتميا تمليه عوامل حضارية واقتصادية وبيئية، ليس من السهل تجاوزها أو اهمالها لانها مرتبطة ارتباطا قويا بمستقبل الامة وضرورة مواكبتها لعصر العلم. وهنا نشير الى أن المؤتمر العربي الاول للطاقة الكهرونووية الذي عقد في دمشق عام 1981 بين بما لا يدع مجالا للشك أو فرصة للتلكؤ انه لا بد من الاهتمام باعداد المهندس العربي ليستوعب التقنية اللازمة لتشغيل وصيانة

المحطات الكهرنووية . ونحن نؤكد بدورنا ان موضوع هندسة الطاقة الكهرونووية يجب أن يدخل من أوسع الأبواب كليات الهندسة الكهربائية في جامعاتنا . كما يجب أن يحظى باهتمام أصحاب القرار السياسي والاقتصادي في بلادنا العربية ، ويلقى أكبر دعم مادي ممكن في أسرع وقت .

المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر تبنى ضمن مشروعاته مشروعات لتأليف وترجمة كتب مرجعية في العلوم الهندسية وذلك بهدف اغناء المكتبة العربية بمؤلفات ومراجع علمية رفيعة المستوى وجعلها في متناول الأساتذة والمختصين في الجامعات العربية وبقية المؤسسات العربية الثقافية والعلمية والصناعية .

وفي هذا الاطار قمنا بتكليف الاستاذ الدكتور مطاوع الاشهب ؛ أحد الاساتذة المعروفين والمشهود لهم في جامعة دمشق وعلى مستوى الوطن العربي بطول الباع في ميادين الرياضيات والتقنيات الكهربائية ، بالاضافة الى الفيزياء النووية وهندسة المفاعلات بتأليف كتاب في مجال الطاقة الكهرنووية .

وقد استجاب مشكورا ، وجاء بثلاثة كتب جمع فيها عصارة مؤهلاته العلمية الوفيرة وممارسته الميدانية في مفاعلات محطات الكهرونووية في كل من سويسرا والمانيا الغربية ، وكتبها بلغة عربية مبينة .

الكتاب الاول خصصه لهندسة الفيزياء النووية ، في حين تحدث الثاني عن هندسة المفاعلات النووية ، وقسمه الى جزأين : الأول في فيزياء المفاعلات النووية ، والثاني في تشغيل المفاعلات النووية .

أما الكتاب الثالث فجعل عنوانه : الإشعاع النووي والحماية من الاشعاع ، والتلوث .

وفي تقديرنا إن الكتب الثلاثة ستكون مرجعا علميا بالعربية للمهندسين الكهربائيين والميكانيكيين المتخصصين ، وكتبا منهجية للدرجة الجامعية الأولى وللتخصص العالي بعد التخرج في مجال هندسة الطاقة النووية وسوف تملأ ثغرة كبيرة في المكتبة العربية العلمية .

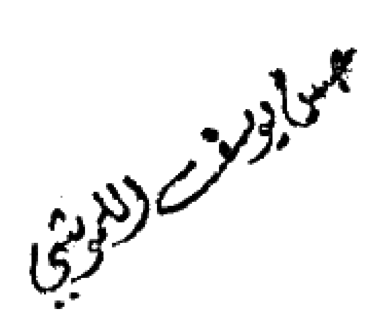
هذا أول قطاف مركزنا اليافع ، ونأمل أن يكون الله قد وفقنا في اختيار الموضوع ، وفي مستوى المادة العلمية للكتب الثلاثة . ولا يسعنا هنا الا أن نزجي الشكر الى المؤلف على استجابته وجهده الكبير في هذا العمل العلمي القيم .

كما نجد لزاما أن ننوه بالدعم الذي تقدمه المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم للمركز ، والاهتمام الواضح الذي يبديه المدير العام الاستاذ الدكتور مسارع الراوي بنشاطات المركز ومشاريعه .

وأخيرا نقول : ان ما يقدمه المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر يعد لبنة جديدة في بناء صرح ثقافة عربية حديثة ، واعداد علمي افضل لابنائنا وزملائنا المهندسين العرب .

الأستاذ الدكتور المهندس أحمد عمر يوسف

مدير المركز العربي
للتعريب والترجمة والتأليف والنشر



المقدمة

أصبحت المفاعلات النووية في أواخر القرن العشرين مصادر طاقة هامة جداً لتوليد التيار الكهربائي والانتفاع به في مجال الصناعة والزراعة وفي تحلية المياه المالحة بالإضافة الى استعمال نتاجات الانشطار النووي كالنظائر المشعة في المجالات الطبية والزراعية .

لقد أحرزت الدول الصناعية الكبرى تقدماً كبيراً في بناء هذه المفاعلات فوضعت برامج لتصميمها بوساطة الحاسوب الألكتروني مما ساعد في دقة التصميم وسرعته .

كان الانشطار النووي الذي يعتبر الأساس في تصنيع المفاعلات النووية حصيلة الكثير من الجهود والأبحاث العلمية ، وان علماء الذرة وفي مقدمتهم العالم جوليو كوري ينتظرون أن يستخدم نتاج أبحاثهم في مجال الفيزياء الذرية لخير البشرية ، إلا أن آمالهم تلاشت تجاه إساءة استخدام العلوم الذرية لأغراض تدميرية كصنع القنابل الذرية والهايدروجينية وغيرها من أسلحة الدمار .

وعلى الرغم من الاحتجاجات الواسعة في العالم على استخدام المفاعلات الانشطارية فان الدول الصناعية لا تزال تعتمد على هذه المفاعلات لتوليد الطاقة الكهربائية .

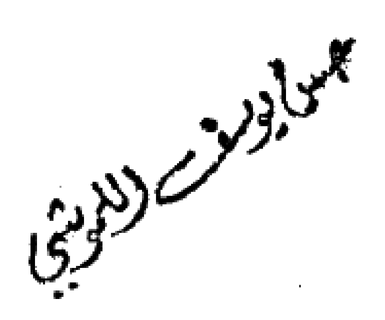
وبانتظار إمكانية الاعتماد على طاقات بديلة أخرى كالمفاعلات الاندماجية أو الطاقات الشمسية والهوائية ، فان المفاعلات الانشطارية ستظل المصدر الأهم للطاقة .

ان أمن المفاعلات الانشطارية والسيطرة عليها لم يتم حتى الآن بشكل مثالي نظراً للتعقيدات المحتملة وللدور الذي يلعبه العامل البشري في هذا المجال ، إلا ان جهوداً كبيرة تبذل للوصول الى موثوقية كافية للمفاعلات وذلك من خلال تكنولوجيا متقدمة ومتعددة .

لا يستطيع العالم العربي والحالة هذه أن يتخلف في مضمار العلوم الذرية والنووية ، وبقاؤه مرهون بمواكبة هذه العلوم ، لذا رأيت من الضروري تأليف كتاب بجزأين عن المفاعلات النووية الانشطارية ، الجزء الأول بعنوان «فيزياء المفاعلات» والجزء الثاني بعنوان «تشغيل المفاعلات» ، يطلع المهندس العربي من خلالها على فيزياء المفاعلات وتشغيلها وعلى طرائق قياس المقادير النووية كالتفاعلية والتدفق النيتروني ، بالإضافة الى كيفية التحكم بتصرف هذه المفاعلات كي تظل حرجة أي مستقرة .

أمل أن أكون قد قدمت للمهندس العربي ولطلاب هندسة المفاعلات النووية في الجامعات العربية معلومات كافية ومفيدة تعينهم على فهم فيزياء المفاعلات وتشغيلها وعلى استخدامها في المحطات النووية وذلك من خلال كتاب وضع بلغة عربية سليمة وبأسلوب يسهِّل على القارىء الفهم والاستيعاب .

المؤلف



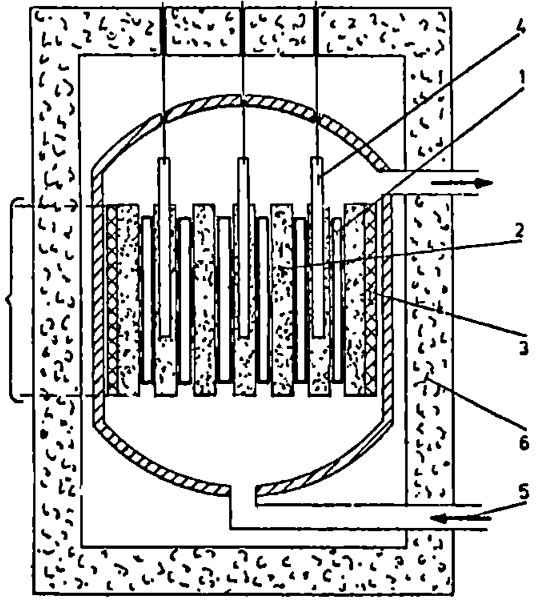
الفصل الأول

1 ـ مكونات المفاعل النووي :

يقوم المفاعل النووي بتحويل طاقة الرباط النووي من خلال الانشطار النووي الى حرارة . يحصل ذلك بسبب تفاعل متسلسل نيتروني . ولديمومة هذا التفاعل المتسلسل في مفاعل حراري مثلاً فان المكونات التالية : مادة الوقود والمهديء والعاكس هي ضرورية .

تحدث الانشطارات النووية في مادة الوقود . وتولِّد النيترونات المحررة بدورها انشطارات نووية أخرى . لزيادة احتمالية الانشطار تكبح النيترونات السريعة الناتجة بمساعدة مهديء الذي يساعد على انخفاض سرعتها عند طاقة حرارية محددة . تسمى المفاعلات ذات المهدىء مفاعلات حرارية يحدث فيها الجزء الهام من الانشطارات بسبب النيترونات الحرارية . مع ذلك فان احتمالية انشطار عال يكون ممكناً أيضاً دون مهديء . يجب في هذه الحالة ان تكون لمادة الوقود كثافة انشطار عالية . تسمى المفاعلات التي ليس لها مهديء المفاعلات السريعة . يحدث الجزء الرئيس من الانشطارات فيها بسبب النيترونات السريعة . ولكي لا ينفلت من قلب المفاعل والمهديء إلا القليل من النيترونات يحاط قلب المفاعل بعاكس الذي يعيد النيترونات الهاربة مجدداً الى قلب المفاعل . هناك

عناصر تحكم ضرورية للتحكم بالتفاعل المتسلسل . وبمساعدة مواد ماصة للنيترونات يمكن التحكم بالتفاعل المتسلسل من خارج المفاعل . ان لوسيط التبريد وللتحجيب أهمية قليلة بالنسبة للتفاعل المتسلسل . تنقل الطاقة المحررة لدى الانشطار من قبل وسيط التبريد الى خارج المفاعل . أما التحجيب فيضعف الاشعاع النووي الصادر عن قلب المفاعل بحيث لا يكون ضاراً بالنسبة لجوار المفاعل . يشاهد توضيع المكونات التي ذكرت آنفاً في الشكل (١ ـ ١) .



شكل (1 ـ 1)

1 ـ مادة الوقود 2 ـ المهديء 3 ـ العاكس 4 ـ قضبان التحكم 5 ـ وسيط التبريد 6 ـ التدريع

1 ـ 1 المكونات اللازمة لديمومة التفاعل المتسلسل :

لديمومة التفاعل المتسلسل في مفاعل حراري فان مواد الوقود والمهديء والعاكس هي ضرورية جداً .

مادة الوقود :

ان وظيفة مادة الوقود هي انتاج الطاقة وتقديم نيترونات جديدة بفعل الانشطار النووي . لذا فان هذه المادة يجب ان تحتوي على نويات قابلة الانشطار .

يستعمل في المفاعلات الحرارية حالياً كمادة وقود أوكسيد اليورانيوم UO^2 .

تتواجد مادة الانشطار هذه في الطبيعة وهي اليورانيوم ـ 235 .

يتوالد من اليورانيوم ـ 235 ، اليورانيوم ـ 238 والبلوتونيوم ـ 239 .

يساهم البلوتونيوم ـ 239 في توليد الطاقة وبذلك فانه يعتبر مادة انشطار ممتازة في المفاعلات السريعة .

ان مادة الوقود لمفاعلات المستقبل السريعة ستكون مزيجاً من أوكسيد اليورانيوم وأوكسيد البلوتونيوم ـ PuO_2 أو كربيد اليورانيوم ـ UC وكربيد البلوتونيوم ـ PuC . ان مادة الانشطار لهذه المفاعلات هي U-235 و Pu-239 .

المهدىء (كابح النترونات) :

ان النترونات الناتجة عن مادة الوقود من خلال الانشطار تُظهر طاقة حركية عالية تبلغ قيمتها الوسطية 2 Mev . وبما ان مقطع الانشطار لهذه النترونات السريعة صغير جداً ، لذا يمتلك المفاعل الحراري مهدئاً وظيفته اكتباح النيترونات السريعة حتى طاقة حرارية قدرها 0,025 eV .

يحدث الاكتباح من خلال تصادمات النيترونات مع نوى المهدىء . تستعمل في مفاعلات المحطات النووية مواد مهدئة مثل الماء الخفيف H_2O وفي حالات نادرة الماء الثقيل D_2O . وفي مفاعلات محطات نووية أخرى يكون المهدىء هو الغرافيت C .

العاكس :

ان النيترونات المتواجدة في حافة قلب المفاعل يمكن ان تنفذ الى الخارج ولكي لا ينفذ الكثير من هذه النيترونات يحاط قلب المفاعل بعاكس . ان وظيفة العاكس هي إذن إعادة النيترونات التي تظهر في حافة المفاعل الى الداخل .

هكذا يصبح بالامكان التوفير في مادة الوقود . تكمن جودة العاكس في نسبة النيترونات المعادة الى عدد النيترونات الكائنة في قلب المفاعل . ويتميز العاكس بالجودة عندما يمتلك صفات الانتثار والتبعثر الجيدة من أجل النيترونات السريعة أي صفة منع انفلات النيترونات من قلب المفاعل . تستعمل ذات المواد للعاكس وللمهدىء .

ان لمادة الوقود والمهدىء في الابقاء على الانشطار النووي أهمية كبيرة سنتكلم عنها فيما بعد .

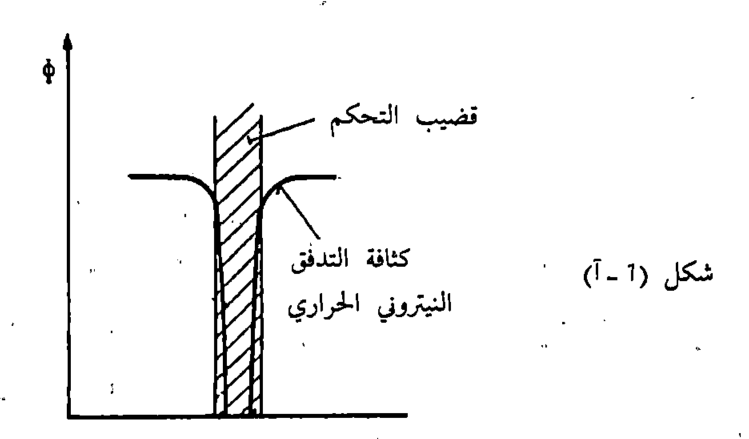
1 ـ 2 المكونات اللازمة للتحكم بالتفاعل المتسلسل :

للتأثير من الخارج على سير التفاعل المتسلسل يحتاج المفاعل الى عناصر تحكم . يجري التأثير على التفاعل المتسلسل من خلال تغيير المحتوى النيتروني أو تغيير تدفق وسيط التبريد .

فإذا أُنقص مثلاً تدفق وسيط التبريد ، تتزايد درجات الحرارة وتتناقص بذلك كثافة مادة الوقود والمهدىء فيصبح المحتوى النيتروني رديئاً ويضعف معه التفاعل المتسلسل . يؤثر أيضاً على التفاعل المتسلسل بتغيير الامتصاص النيتروني . ولتغيير هذا الامتصاص نستعمل مواد ماصة للنيترونات مثل البور والكادميوم . تدخل مواد الامتصاص هذه الى المفاعل على شكل قضبان ولدى المفاعلات المهدأة بالماء يمكن ادخال البور الماص على شكل حمض البور موزعاً توزعاً ناعماً بشكل منتظم . اذا توضعت المواد الماصة في المهدىء على شكل قضبان فان توزع كثافة التدفق النيتروني يأخذ الشكل المبين في (1 ـ 1) وبسبب مقطع الامتصاص العالي تُقتنص النيترونات عملياً على سطوح قضبان التحكم التي تكون على شكل قضبان رقيقة أو على شكل صفائح متصالبة وبالطبع فان شكل القضيب يتأثر بكيفية توضيع مادة الوقود .

تشكل عناصر التحكم جزءاً من نظام التحكم ويمكن استخدامها بمثابة عناصر أمان أو عناصر قيادة أو عناصر تحكم . لا تتدخل عناصر الأمان لدى الشغل العادي للمفاعل في التفاعل المتسلسل ، وإنما تستخدم لدى الشغل غير

الطبيعي لتوقيف التفاعل المتسلسل . ولأبطال التفاعلَ المتسلسل يتم ادخال قضبان التحكم بسرعة في قلب المفاعل أو يُسمَّم المهدىء بحمض البور .



شكل (٦ ـ آ)

تستخدم عناصر القيادة لقيادة التفاعل المتسلسل وللتوازن في تغيرات الامتصاص النيتروني التي نجمت عن ظهور مواد انشطار سامة كالكسنون والسماريوم بسبب تغير حرارة مواد المفاعل والاستهلاك وعملية التوالد .

تتم أيضاً قيادة التفاعل المتسلسل بتغيير موضع قضبان التحكم أو بتغيير تدفق وسيط التبريد أو لدى تغيير تركيز حمض البور في المهدىء . ولقيادة توزع التدفق النيتروني موضعياً يستخدم ما يسمى بقضبان التعويض المكونة جزئياً من مادة ماصة للنيترونات والتي تساعد في انقاص الاهتراء الموضعي لمادة الوقود والانتاج الموضعي المفرط للكسنون . وبما اننا نرغب في تشغيل المفاعل مدة طويلة دون تبديل عناصر الوقود ، نضع في المفاعل كمية كبيرة من مواد الوقود . وفي مفاعل جديد لا تكفي قضبان التحكم مفردة للتحكم بالتفاعل المتسلسل . لذا فان مهديء مفاعلات الماء المضغوط يُسمَّم بشدة بحمض البور .

وبما ان تركيز حمض البور لا يجب ان يتجاوز حداً معيناً لأسباب أمنية فانه يجري تثبيت قضبان من البور اضافية في عناصر الوقود الجديدة لمفاعلات الماء المضغوط .

تحتوي مادة وقود مفاعلات الماء المغلي على الغودوليوم الماص للنيترونات .
يتناقص مفعول الامتصاص لقضبان البور والغودوليوم ببطء خلال تشغيل المفاعل .

ان وظيفة عناصر التحكم تتمثل بتصحيح متواصل للامتصاص النيتروني بحيث يظل التفاعل المتسلسل ثابتاً .

يحصل هذا التحكم من خلال تغيير وضعية قضبان التحكم أو من خلال تغيير في تدفق وسيط التبريد وذلك بمساعدة نظام تحكم ذاتي .

1 ـ 3 التبريد والتحجيب :

ان للتبريد والتحجيب أهمية ضئيلة فيما يتعلق بالتفاعل المتسلسل .

وسيط التبريد : يجب ان تستجر الحرارة المولدة في المفاعل باستمرار بمساعدة وسيط التبريد الذي ينساب حول مادة الوقود والذي يتم دفعُهُ الى مبدل الحرارة أو مباشرة الى العنفة .

تستعمل المواد التالية كوسائط تبريد :

ـ ثاني أوكسيد الفحم الغازي والهيليوم .

ـ الماء الخفيف أو الماء الثقيل .

ـ المعادن السائلة (الصوديوم) .

يجب ان يكون لوسائط التبريد سعة حرارية عالية وامكانية اشعاع عالية وامتصاص نيتروني منخفض وصفات تآكل ضعيفة . وفي معظم المفاعلات يكون الماء في الوقت نفسه وسيط تبريد ومهديء .

التحجيب : يولِّد مفاعل الاستطاعة من خلال الانشطار نيترونات واشعاع غاما . ينبعث أيضاً اشاع غاما لدى المفاعل المتوقف عن العمل ، وذلك من خلال نتاجات الانشطار ومن مواد البناء المنشَّطة . ان هذه الاشعاعات النووية هي ضارة بالانسان وبالمواد ولذلك يجب حماية مجال المفاعل منها بوساطة عملية التحجيب .
تُضعف المواد الثقيلة كالرصاص والباريبيتون بشكل فعال أشعة غاما .

تمتلك النيرتونات السريعة لدى معظم المواد مقطع امتصاص صغير بينما تؤسر النيترونات الحرارية في المواد ذات مقطع الامتصاص العالي . هنا يجب التنبه

بان المكونات الاشعاعية التي نجمت عن التفاعل النووي بشكل ثانوي مثل اصدار (n,α) ، هي سهلة التحجيب .
بالإضافة الى ذلك لا يسمح للتحجيب بان ينشّط من قبل الرجم النيروني .

1 ـ 4 مواد الوقود والمهديء :

ان لمواد الوقود والمهدئات أهمية كبرى في ديمومة التفاعل النووي . تظهر في مادة الوقود بفعل الانشطار نيترونات جديدة ولكي تُحدث هذه الأخيرة انشطارات أخرى يجب ان تكتبح في المهديء عند طاقة حرارية . في حالة عمل المفاعل يحدث في مواد الوقود والمهديء توزع نيتروني معين ذو أهمية كبرى في شغل المفاعلات وتصميمها .

1 ـ 5 مادة الوقود :

ان وظيفة مادة الوقود هي كما هو معلوم تقديم طاقة ونيترونات جديدة بفعل الانشطار النووي . فيما يتعلق بتحرير الطاقة فان جميع مواد الوقود المستعملة لها ذات الكفاءة وهي تقديم 200 ev للانشطار الواحد . ولكن فيما يتعلق باحتمال الانشطار وتحرير النيترونات هناك مفارقة . في الواقع تكون مادة الوقود جيدة اذا اكتسبت الخواص التالية :

يجب ان تكون نسبة مقطع الانشطار Σ_f الى مقطع الامتصاص Σ_a كبيرة ما أمكن هذا يعني ظهور نيترونات جديدة كثيرة لدى الانشطار الواحد .

1 ـ 6 المردود النيتروني :

ان المردود النيتروني يعبِّر عن جودة مادة الوقود ويحسَب من العلاقة :

$$\eta = \nu . \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}$$

حيث :

η : هو المردود .
ν : الناتج الانشطاري .

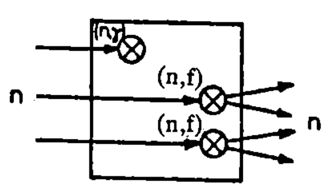
Σ_f : المقطع الانشطاري لمادة الانشطار .

Σ_a : مقطع الامتصاص لمادة الوقود .

في حالة احتواء مادة الوقود على U-235 و Pu-239 نحصل على η بالعبارة :

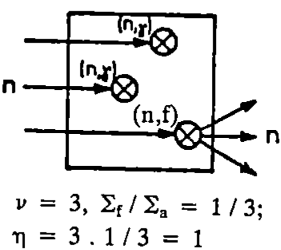
$$\eta = \frac{\nu_{U-235}.\Sigma_{f,U-235} + \nu_{Pu-239}.\Sigma_{f,Pu-239}}{\Sigma}$$

لتفسير المعنى الفيزيائي للمردود النيتروني نقارن بين الشكلين (1 ـ 2) و (1 ـ 3) .



$\nu = 2,\ \Sigma_f / \Sigma_a = 2/3;$
$\eta = 2 . 2/3 = 4/3$

الشكل (1 ـ 2) مادة وقود جيدة



$\nu = 3,\ \Sigma_f / \Sigma_a = 1/3;$
$\eta = 3 . 1/3 = 1$

الشكل (1 ـ 3) مادة وقود رديئة

نعلم من الفيزياء النووية ان النويات تشطر بنيترونات حرارية بينما تشطر النويات U-238 و Pu-239 بالنيترونات السريعة فحسب . ان صلاحية هذه النويات كمواد انشطار تعطى أيضاً من قبل المردود النيتروني الذي يحسب من قبل العلاقة التالية :

$$\eta = \nu . \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

حيث :

σ_f : هو مقطع الانشطار لمادة الانشطار .

σ_a : هو مقطع الامتصاص لمادة الانشطار .

يشاهد المردود النيتروني لمواد الانشطار المذكورة سابقاً في الجدول الآتي :

معطيات لانشطارات حرارية

نوكليد	σ_s[barn]	σ_γ[barn]	σ_f[barn]	ν	η
U-235	15	98,38	583,54	2,5	2,1
U-233	12	47,7	531,1	2,5	2,3
Pu-239	8	268,8	742,5	2,9	2,1

معطيات لانشطارات سريعة

نوكليد	σ_s[barn]	σ_γ[barn]	σ_f[barn]	ν	η
U-135	15	0,5	2,0	2,5	2,0
U-233	12	0,3	2,6	2,6	2,3
Pu-239	8	0,4	1,8	3,1	2,5
U-238	13	0,1	0,3	2,7	2,0
Th-232	16	0,1	0,1	2,0	1,0

يلاحظ من الجداول السابقة ما يلي :

ان أفضل مادة انشطار للمفاعلات الحرارية هو اليورانيوم U-233 وللمفاعلات السريعة هو البلوتونيوم Pu-239 . أمّا U-238 و Th-332 ، فلا يعتمدان كمواد انشطار لأن انشطارهما يتطلب طاقة نيترونية تساوي على الأقل 1 Mev . والاحتمال في ان نيترونات من طاقات عالية كهذه تحدث انشطارات هو ضعيف حتى في المفاعلات السريعة .

1 ـ 7 مواد وقود المفاعلات الحالية :

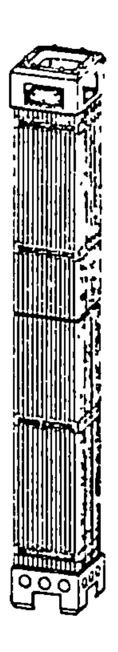
يوجد في الطبيعة عنصر واحد طبيعي فحسب يستعمل كوقود في المفاعلات وهو اليورانيوم . يحتوي اليورانيوم الطبيعي على مادة الانشطار U-235 بنسبة قليلة 0.72% . لذا فان اليورانيوم الطبيعي له مردود نيتروني منخفض يساوي 1,4 ويستعمل كمادة وقود في المفاعلات المهدأة بالماء الثقيل أو بالغرافيت فحسب .

يستعمل في المفاعلات الحالية المهدأة بالماء الخفيف كمادة وقود أوكسيد اليورانيوم UO_2 المخصَّب بنسبة 3% من اليورانيوم U-235 . يبلغ مردود هذا الوقود تقريباً 1,9 .

يوضع أوكسيد اليورانيوم هذا في هذه المفاعلات على شكل أقراص تملأ أنابيب غير قابلة النفاذ بالنسبة للغازات ومصنوعة من خليط الزركالوي (Zirkaloy) .

ان قضبان الوقود هذه تجمَّع بحيث تشكل حُزَماً وتوضَّع كوقود لمفاعلات الماء المضغوط . تحتوي المفاعلات الحديثة التي تبلغ استطاعتها 3000 MW على مئتين من هذه الحزم التي تحتوي بدورها على حوالي 40000 قضيباً .

يشاهد في الشكل (1 ـ 4) عنصر وقود (أي حزمة) يستعمل في مفاعلات الماء المضغوط .



الشكل (1 ـ 4)

ان مواد الوقود التي تحتوي على البلوتونيوم 239 واليورانيوم 233 ، ستستعمل في المفاعلات السريعة المستقبلية والمفاعلات ذات الحرارة العالية .

1 ـ 8 المهدىء :

يقوم المهدىء باكتباح النيترونات السريعة عند طاقة حرارية تساوي تقريباً 0,025 e V . يجري الاكتباح من خلال تصادم النيترونات مع نوى المهديء . ولكي لا تؤسر النيترونات خلال الاكتباح في قمم رنين اليورانيوم 238 يجب ان يكون مسار الاكتباح قصيراً قدر الأمكان . لذا يحتوي المهديء الجيد على نوى ذرات خفيفة . عندئذ يصبح الضياع الطاقي للنيترون من أجل التصادم الواحد كبيراً وعند ذلك يتم اكتباح النيترون بعد بضع تصادمات عند طاقة حرارية . يرمز بِـ ξ الى الضياع الطاقي النسبي للنيترون في التصادم الواحد . يكون بالاضافة الى ذلك مسار الاكتباح قصيراً عندما تحدث تصادمات كثيرة في عنصر حجم من المهديء .

يتطلب ذلك مقطع تبعثر مجهري عال وكثافة مهديء كبيرة . إذن مقطع تبعثر عياني Σ_s عال . تمتص الآن النيترونات الحرارية الكائنة في المهديء من قبل مواد الوقود . تتسم جودة المهديء بأن يكون له مقطع امتصاص Σ_a صغير .

حساب جودة المهدىء :

نحسب جودة المهدىء التي يرمز إليها بـ G من العلاقة التالية :

$$G = \xi . \frac{\Sigma_s}{\Sigma_a}$$

لاكتباح النيترون من 2 Me V حتى 0,025 e V ، يجب حدوث عدد S من التصادمات في المهديء . يعتمد عدد التصادمات S بالطبع على الضياع الطاقي ξ للتصادم الواحد . لدينا :

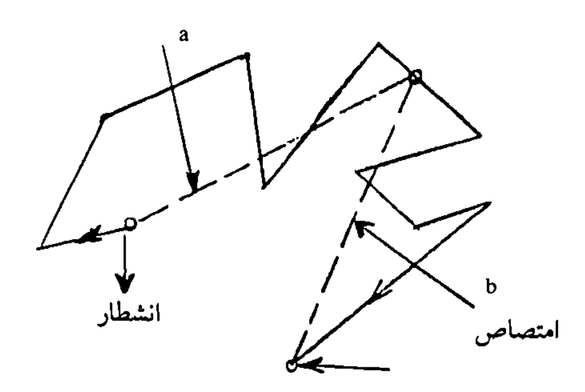
$$\xi = \frac{18,2}{S}$$

ان القيم التي تحدد جودة المهديء موجودة في الجدول التالي وذلك للمهدئات H_2O, D_2O, C و Be .

المهدىء	ξ[-]	S[-]	$\Sigma_s[cm^{-1}]$	$\Sigma_a[cm^{-1}]$	G[-]	a[cm]	b[cm]
H_2O	0,39	20	1,5	0,022	64	13	5,5
D_2O	0,51	36	0,35	0,000033	5500	25	340
C	0,16	114	0,37	0,00026	230	43	104
Be	0,21	87	0,75	0,0011	150	22	44

في هذا الجدول ، الى جانب القيم $\xi, S, \Sigma_s, \Sigma_a$ و G ، نجد أيضاً المسارات التي يقطعها النيترون الى أن يكتبح ويُمتص . ان مسار الاكتباح a يجب كما هو معلوم ان يكون قصيراً .

يتصادم النيترون الحراري باستمرار بسبب الحركة الحرارية بنوى المهدىء ويظل يتحرك فيه الى ان يُمْتَص . ان المسار الوسطي الناتج عن هذه الحركة هو كبير لدى مهدىء جيد . يستعمل غالباً الماء الخفيف كمهدىء وفي أكثر الحالات يستعمل كمهدىء ووسيط تبريد في آن واحد . ولما كان للماء الخفيف مقطع امتصاص عال فان مادة الوقود تكون مخصَّبة في المفاعلات المهدأة بالماء الخفيف .



يعتبر الماء الثقيل D_2O مهدئاً ممتازاً لأنه يمتلك قدرة امتصاص نيترونية أصغر مما للماء الخفيف . يمكن في المفاعلات المهدَّأة بالماء الثقيل استعمال اليورانيوم

الطبيعي كمادة وقود . يجب ان يكون الماء الثقيل نقياً جداً ولهذا السبب فانه غالي الثمن .

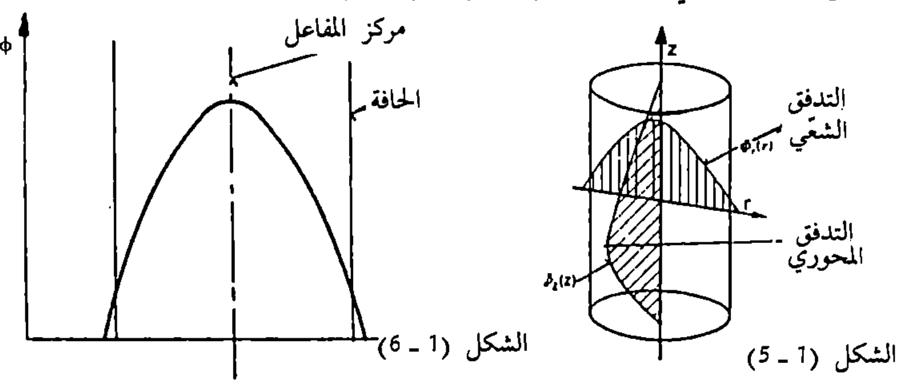
ان الغرافيت C هو مهديء أقل جودة من الماء الثقيل ، يمكن الحصول عليه نقياً بأسعار متدنية ويستعمل غالباً في المفاعلات المبرَّدة بالغاز بالإضافة الى انه يتحمل حرارة تسخين عالية اذ تبلغ حرارة تبخره 3650°C . ينتج عن ذلك تحمل حرارة تبريد غازي عالية جداً . يمكن في مفاعلات الغرافيت المبرَّدة بالغاز استعمال اليورانيوم الطبيعي كمادة وقود .

كذلك الباريليوم Be هو مادة مهدئة ملائمة وهو بالاضافة الى ذلك معدن خفيف تبلغ كثافته الكتلية $1,859\ cm^{-3}$ ، يتمتع بنقطة ذوبات عند 1284°C . يصمد الباريليوم ضد الاشعاع فهو غالي الثمن . وبما انه مادة سامة يندر استعماله .

1 ـ 9 التوزع النيتروني في قلب المفاعل :

يتشكل في قلب مفاعل نووي في حالة العمل توزعٌ نيتروني نتكلم عنه باختصار .

تظهر بفعل الانشطار النووي نيترونات حرة . تتحرك هذه النيترونات بسرعة كبيرة وتختفي بطريقتين : اما ان تُمتَص من قبل مواد المفاعل واما ان تنفلت من المفاعل وبالطبع فان النيترونات الموجودة على حافة المفاعل تنفلت بسهولة أكبر من التي موجودة في مركز المفاعل . ينتج عن ذلك توزع كثافة نيترونية شعيَّة ومحورية يشاهد في الشكلين (1 ـ 5) و(1 ـ 6) .

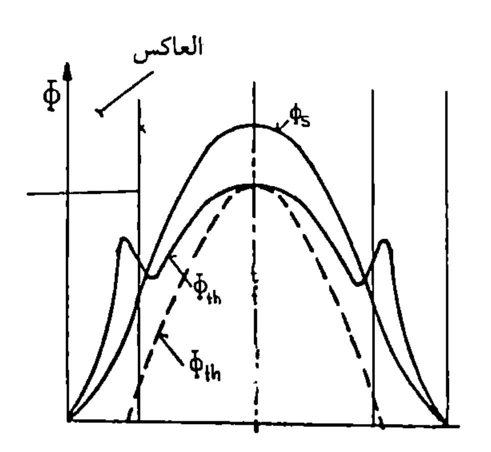


الشكل (1 ـ 6)

الشكل (1 ـ 5)

1 ـ 10 التوزع النيتروني في مفاعل ذي عاكس :

ان العاكس يبعثر أو يُعيد النيترونات من جديد الى داخل المفاعل . ونتيجة لذلك يصبح التدفق النيتروني أكثر تسطحاً . وبما انه تظهر في العاكس نيترونات حرارية بفعل اكتباح النيترونات السريعة (ϕ_s) ، وان الامتصاص هو أقل في العاكس مما في قلب المفاعل ، يُظهر التدفق النيتروني في العاكس قمةً لخلو هذا الأخير من منبع نيتروني . انظر الشكل (1 ـ 7) .



الشكل (1 ـ 7)

يمثل المنحني المنقط كثافة التدفق الحراري ϕ_{th} دون عاكس اما المنحني المستمر فيمثل كثافة التدفق النيتروني مع عاكس ، بينما يمثل المنحني ϕ_s كثافة التدفق العائدة الى النيترونات السريعة .

1 ـ 11 التوزع النيتروني في مفاعلات المحطات النووية :

في مفاعلات المحطات النووية ، يجب قدر الامكان تحرير كمية كبيرة من الحرارة .

ان استطاعة المفاعل يجب ان تكون عالية غير انها محدودة عند الكثافة الاستطاعية الأعظمية المسموح بها :

تعطى استطاعة المفاعل من العلاقة :

$$P_W = E_{RW}.\Sigma_f.V.\phi_{th}$$

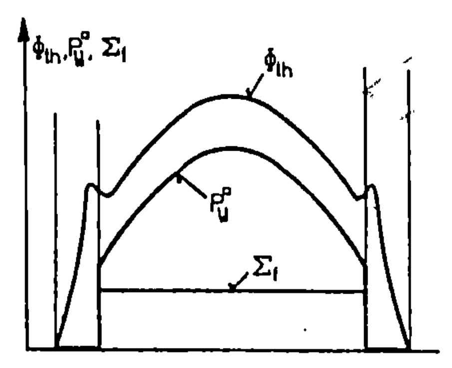
حيث E_{RW} هي الطاقة المحوَّلة الى حرارة و V هو حجم المفاعل بينما تعطى الكثافة الاستطاعية من العلاقة :

$$\frac{P_W}{V} = P_W^{\circ} = E_{RW}\, \Sigma_f . \Phi_{th}$$

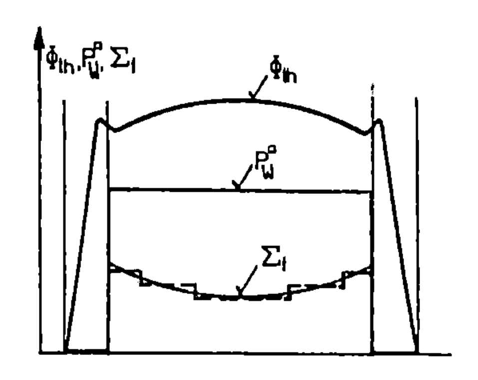
إذا كان مقطع الانشطار العياني ثابتاً ، فان منحني الكثافة الاستطاعية له ذات تصرف كثافة التدفق النيتروني الحرارية . تبلغ الكثافة الاستطاعية قيمتها الأعظمية في الوسط . انظر الشكل (1 ـ 8) .

يمكن بلوغ استطاعة أعلى لدى تسطح أكبر في منحنى الكثافة الاستطاعية . وللحصول على تسطح في توزع الكثافة الاستطاعية ، يجب ان يتزايد مقطع الانشطار كلما اقتربنا من حافة المفاعل . ذلك يؤثر على التسطح المطلوب .

ان التصرف الشعِّي لمقطع الانشطار يمكن اختباره من خلال توضيع ملائم لعناصر وقود مختلفة التنشيط ومختلفة الاحتراق بحيث فيما يتعلق بكثافة التدفق النيتروني نحصل على التوزع الاستطاعي المطلوب . انظر الشكلين (1 ـ 8) و (1 ـ 9) .



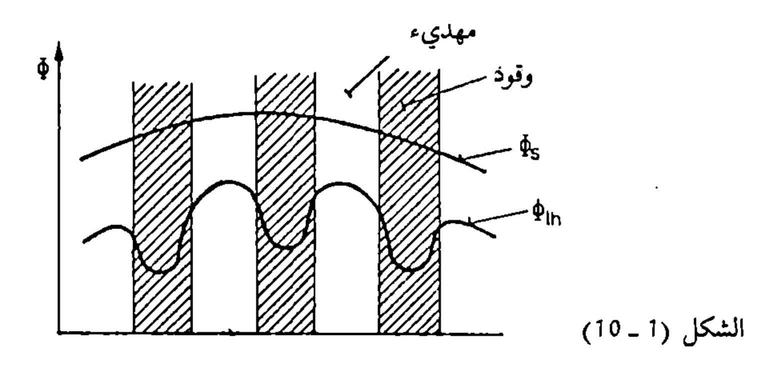
الشكل (1 ـ 8)



الشكل (1 ـ 9)

1 ـ 12 التوزع النيتروني في مادة الوقود وفي المهديء :

بما ان مادة الوقود توضع في المهديء على شكل قضبان فانه يجب مناقشة التوزع النيتروني الموضعي بدقة أكبر .



الشكل (1 ـ 10)

تُكبح النيترونات السريعة الناتجة عن الانشطار في المهدىء لتصبح نيترونات حرارية . ولذا يمكن اعتبار المهديء كمنبع قوي للنيترونات الحرارية وبما ان المهديء لا يمتص الا القليل من النيترونات ، تتشكل فيه كثافة تدفق نيتروني حرارية عالية . ان النيترونات الحرارية تصل من المهديء الى مادة الوقود فتُمْتَص هناك لتحدث انشطارات جديدة . وبما ان الامتصاص في مادة الوقود كبير ، فان كثافة التدفق النيتروني تتناقص بشدة عند مركز مادة الوقود ولذلك تستعمل في المفاعلات الحديثة قضبان وقود رقيقة .

الفصل الثاني

2 ـ تصنيف المفاعلات :

يتبين من الفقرات السابقة انه بالامكان تصور ترتيبات مختلفة لمواد الوقود والمهدئات ووسائط التبريد . تعالج في هذه الفقرة مختلف بنى المفاعلات ووظائفها .

2 ـ 1 التصنيف بالنسبة لنوع التفاعل المتسلسل :

لدى اعتبار التفاعل المتسلسل تظهر امكانياتان للانشطار : يمكن ان يحدث الانشطار اما بسبب النيترونات الحرارية أو بسبب النيترونات السريعة .

ان المفاعلات التي يتم فيها الجزء الرئيس من الانشطارات من قبل النيترونات الحرارية تسمّى بالمفاعلات الحرارية وأما المفاعلات التي يتم فيها الجزء الرئيس من الانشطارات من قبل النيترونات السريعة فتسمى بالمفاعلات السريعة .

2 ـ 2 المفاعل الحراري :

ان المفاعلات الحرارية هي مصممة بحيث تتم الانشطارات فيها من قبل النيترونات الحرارية . تبلغ الطاقة النيترونية السائدة في المفاعلات الحرارية

0,025 ev . ولكي يكون بالامكان اكتباح النيترونات السريعة الى نيترونات حرارية يحتاج المفاعل الى مهديء .

ولديمومة التفاعل المتسلسل يجب ان يؤخذ مقطع الانشطار العياني قيمة محددة . وبما ان مقطع الانشطار العياني للنيترونات الحرارية كبير فانه من الممكن من أجل مادة انشطار قليلة ، الحصول على مقطع انشطار عياني عال . يستعمل لهذا السبب ، في مفاعل حراري اليورانيوم الطبيعي ، أو اليورانيوم المخصَّب قليلاً كوقود . لأجل ذلك يظل اختيار مادة المهدىء ومواد بناء المفاعل المتبقية محدوداً بسبب مقطع الامتصاص المرتفع . يكثر بناء المفاعل الحراري المبرَّد والمهدّأ بالماء لسهولة تصميمه وتكاليف بنائه المنخفضة .

2 ـ 3 المفاعل السريع :

تصمم المفاعلات السريعة لتقديم انشطارات بسبب النيترونات السريعة . تبلغ الطاقة الأكثر تصادفاً في هذه المفاعلات 80 Kev . لا يحتاج المفاعل السريع مهدئاً ولذا فان حجمه صغير ، وبسبب امكانية الامتصاص الضعيفة للنيترونات السريعة تتوفر لدينا حرية كبيرة في اختيار مواد بناء هذه المفاعلات . يسمح هذا التوفير في الفقد النيتروني بانتاج كبير من مواد انشطار جديدة (مفاعل التوالد) وبما ان مقطع الانشطار المجهري للنيترونات السريعة صغير فان كثافة مادة انشطار عالية (مثلاً يورانيوم مخصَّب بشدة) ضرورية .

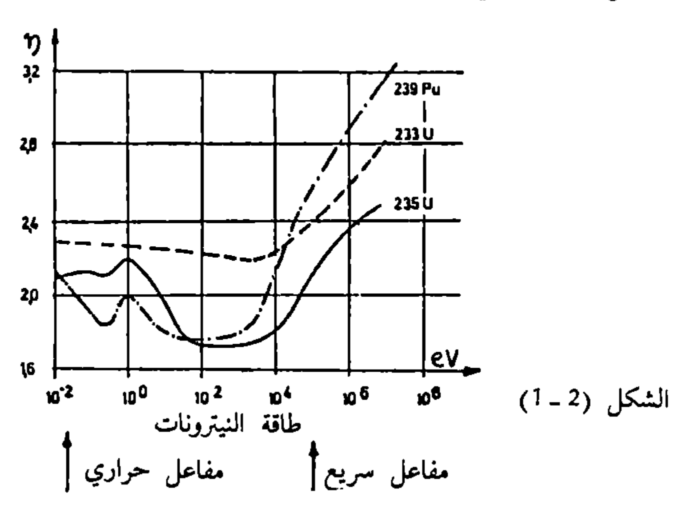
وبسبب صغر حجمها فان المفاعلات السريعة تمتلك كثافة استطاعة عالية . ولاستمرار هذه الحرارة تحتاج هذه المفاعلات الى مبرِّد ذي كفاءة استطاعية عالية . ليس بالامكان استعمال الماء أو مواد أخرى مهدئة . ولكن يمكن استعمال معادن سائلة كوسائط تبريد كالصوديوم Na أو الغازات المضغوطة مثل (He, CO_2) . وبالرغم من امكانية الامتصاص الصغيرة للنيترونات السريعة فان التحكم بهذه المفاعلات ممكن بوساطة مواد ماصة ملائمة . من هذه المواد نذكر البور ـ 10 والليتيوم ـ 6 .

يجب الانتباه هنا بان المفاعل السريع بالنسبة لتغير الاستطاعة الزمني وفي الحالة تحت الحرْجة الفورية ، ليس أسرع من المفاعل الحراري لأن التفاعل

المتسلسل النيتروني سيجري التحكم به من قبل النيترونات المتأخرة . ان كلمة سريع هي منسوبة الى طاقة النيترونات وليس للزمن التي تجري خلاله التغيرات الاستطاعية .

2 ـ 4 علاقة المردود النيتروني بالطاقة :

نبين فيما يلي كيف ان المفاعلات الحرارية والسريعة هي مناسبة لتحقيق التفاعل المتسلسل . ان المردود النيتروني η يعتمد بشدة بسبب مقطع الانشطار ومقطع الامتصاص على الطاقة الحركية للنيترونات التي امتصتها مادة الانشطار . يتبين من الشكل (2 ـ 1) بوضوح ان المردود النيتروني في المفاعلات الحرارية والسريعة هو كبير .



الشكل (2 ـ 1)

يتضح من الشكل (2 ـ 1) ان المردود النيتروني في المفاعلات الحرارية (الطاقة النيترونية الأكثر احتمالاً تساوي 0,025 eV) . وفي المفاعلات السريعة (الطاقة النيترونية الأكثر احتمالاً تساوي 80 Kev) ، هو كبير .

وان المردود النيتروني بين هذين المجالين للطاقة هو صغير . ان مجال الطاقة بين 0,025 eV و 80 KeV هو أقل ملاءمة لتحقيق التفاعل المتسلسل . ونلاحظ في الشكل (2 ـ 1) ان اليورانيوم 233 هو أفضل مادة انشطار في المفاعلات الحرارية وان البلوتونيوم 239 هو أفضل مادة انشطار في المفاعلات السريعة .

2 ـ 5 التصنيف بالنسبة لتوزع مادة الوقود :

توضَّع مادة الوقود في شكلين :

ـ توزع مادة الوقود في مهديء مفاعل متجانس كمسحوق منتثر بشكل منتظم (سائل مادة الوقود) .

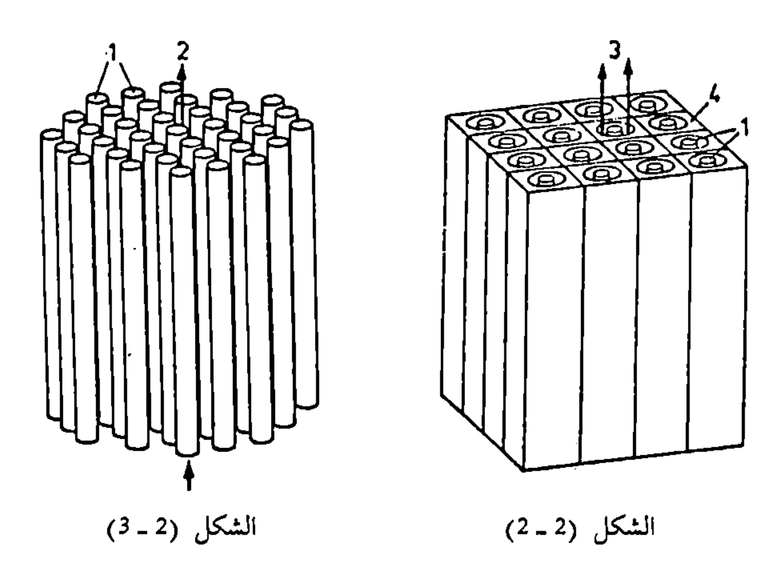
ـ تكون مادة الوقود مفصولة عن المهديء في مفاعل غير متجانس (عناصر الوقود) .

2 ـ 6 المفاعل المتجانس :

في بداية تطور المفاعلات بذلت محاولة لتحقيق مفاعلٍ متجانس باستعمال محلول ملح اليورانيوم في الماء . وان الوقود كسائل أصبح يُضخ من خارج المفاعل من خلال مبدل حراري . ان ميزة مثل هذه الطريقة تكمن في سهولة التصميم وفي امكانية فصل نتاجات الانشطار عن بعضها وتجديد مادة الوقود . لقد فشل هذا المشروع بسبب عوامل التآكل .

2 ـ 7 المفاعل غير المتجانس :

يستخدم في المفاعلات غير المتجانسة وقود صلب داخل أغلفة على شكل قضبان موضَّعة في قلب المفاعل . اما المهديء فيمكن ان يكون صلباً أو سائلاً بينما يكون وسيط التبريد سائلاً أو على شكل غاز . بالمقارنة مع المفاعل المتجانس فان المفاعل غير المتجانس يتمتع بموازنة نيترونية أفضل لأن النيترونات هنا تُكبح في المهديء فحسب ويكون لديها امكانية الانفلات من الأسر الرنيني لليورانيوم U-238 . ان معظم مفاعلات المحطات النووية ومفاعلات البحوث هي غير متجانسة . في الشكل (2 ـ 2) والشكل (2 ـ 3) ، يشاهد تركيب مفاعلات المحطات غير المتجانسة حيث نجد في هذين الشكلين :



الشكل (2 ـ 3)   الشكل (2 ـ 2)

1 ـ عناصر الوقود . 2 ـ وسيط التبريد والمهديء . 3 ـ وسيط التبريد كغاز . 4 ـ المهديء .

2 ـ 8 التصنيف وفق الاستخدام :

تستخدم الحرارة المحرَّرة في المفاعلات لأهداف كثيرة . تحول الحرارة في المحطات النووية الى عمل كهربائي أو مباشرة لغرض التدفئة (التدفئة عن بعد) أو لتحلية مياه البحر . وحسب الاستخدام تكون المحطة النووية ثابتة أم متحركة . تستخدم هذه الحرارة أيضاً في تشغيل وسائل النقل كالبواخر والغواصات (Otto- Hahn, Nautilus) ومستقبلاً من أجل محركات الصواريخ .

يستخدم مفاعل البحوث غالباً في فحص واختبار بعض المواد ومكوِّنات المفاعلات ، أما الحرارة الناتجة فلا تستخدم في هذا النوع من المفاعلات .

يحدث في المفاعلات بالاضافة الى الحرارة اشعاعات نووية (مثلاً الاشعاع النيتروني) . وتستخدم هذه الاشعاعات في مجال البحوث وفي الطب والتكنيك . ولتحقيق هذه الأهداف تبنى مفاعلات ذات اشعاع شديد أي ما يسمى مفاعلات التدفق العالي . ان مفاعلات البحوث يمكن اعتبارها أو استعمالها كمنابع اشعاع .

لا يمكن بوساطة الاشعاع النيتروني انتاج مادة انشطار طبيعيَّة كالبلوتونيوم مثلاً وتسمى المفاعلات التي تستعمل لهذا الغرض (محطات نووية عسكرية) مفاعلات الانتاج .

نظرة الى المستقبل :

هناك مبدئياً طريقتان لتحرير الطاقة النووية واستثمارها في المحطات النووية .

أولاً : من خلال انشطار النوى الثقيلة .

ثانياً : في إذابة النوى الخفيفة (الاندماج) .

جميع أنواع المفاعلات التي رأينا حتى الآن تعمل بفعل الانشطار .

2 ـ 9 الاندماج النووي :

يطور الاندماج النووي اليوم بشكل سريع . وللتغلب على قوى كولون المتدافعة بين النوى الفاعلة يجب على هذه النوى ان تتصادم مع بعضها البعض بطاقة حركية عالية . لا يمكن بلوغ هذه الطاقة الحركية إلا بوساطة درجات حرارة عالية تبلغ أحياناً مئة مليون درجة مئوية . وان الحاوي لهذه المادة التي هي عبارة عن بلاسما ساخنة جداً هي الساحات الكهرمغنطيسية . فالتحقيق التقني للاندماج لم يحصل بعدُ بسبب المشاكل التكنولوجية . وأما النتائج الاقتصادية لمفاعلات الاندماج المستقبلية فليست منظورة حتى الآن .

2 ـ 10 التيار بواسطة طريقة مباشرة :

اذا تطلعنا بعيداً الى المستقبل نرى انه يجب التفكير بإيجاد وسيلة تمكننا من الحصول على التيار بطريقة مباشرة أي دون المرور بالعنفة والمولد . ان مبدل الطاقة في هذه الأثناء والذي نفكر فيه هو المولد الهدرومغنطيسي الديناميكي (Magnetohydrodyn) الذي له بالتالي علاقة غير مباشرة مع استثمار قوى النوى ولكنه مع ذلك تطبيق لفيزياء البلاسما الذي يقود الى مفاعل الاندماج .

ان مبدأ المولِّد الهدرومغنطيسي الديناميكي أو مبدل الطاقة هو سهل جداً . تُرشُّ البلاسما المتدفقة من خرطوم في ساحة مغنطيسية عمودية على هذا التدفق ، ان جزئيات البلاسما الموجبة والسالبة تتصادم كل منها على حدى بمسريين متقابلين اذ تتخلى هذه الجزئيات عن شحناتها فتولِّد بذلك بين المسريين جهداً كهربائياً .

الفصل الثالث

3 ـ أنواع مفاعلات المحطات النووية :

يتم تركيب مكونات المفاعل بحيث تصلح لبناء أنواع مختلفة من المفاعلات . نأتي في الفقرة التالية على وصف أهم مفاعلات المحطات النووية . ان جزءاً من هذه المفاعلات قد تم بناؤه فعلاً والجزء الآخر هو في مرحلة البناء .

3 ـ 1 مفاعل الغرافيت المبرَّد بالغاز :

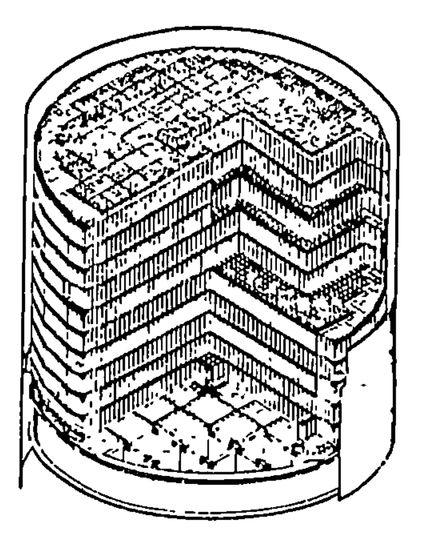
نقدم فيما يلي شرحاً لمبدأ تصميم مفاعل الغرافيت المبرد بالغاز . ان المفاعلات ذات درجة الحرارة العالية قد تفوقت على مفاعلات الغرافيت . وأول مفاعل غرافيت كان قد تحقق من قبل العالم فيرمي في شيكاغو عام 1942 . هذا المفاعل المهدأ يعمل بوساطة اليورانيوم الطبيعي .

مفاعل ماغنوس :

(أول توليد للتيار حصل في تشرين الأول عام 1956) .

كانت انكلترا البلد الرائد في استثمار الطاقة النووية لتوليد التيار الكهربائي . وكانت النية آنذاك معقودة على صناعة قنبلة البلوتونيوم ومن أجل ذلك طورِّت محطات نووية باستخدام اليورانيوم والغرافيت . ان قضبان مواد

الوقود لهذا النوع من المفاعلات ستكون من معدن اليورانيوم الطبيعي وهي محاطة بغلاف من الماغنوس الذي هو عبارة عن خليط من الماغنيزيوم . توضع هذه القضبان عموديةً في أقنية كتلة كبيرة من الغرافيت . تضخً في هذه الأقنية مادة ثنائي أوكسيد الفحم لتبريد مواد الوقود . يُجرُّ ثنائي الأوكسيد الساخن جداً الى مولد بخار موصول في الجزء التقليدي من المحطة النووية . انظر الشكل (3 ـ 1) .



الشكل (3 ـ 1) .

تكمن محاسن مفاعلات ماغنوس بانها تشغًل باليورانيوم الطبيعي . وتتميز مساوئها بأنَّ عناصر وقودها المعدنية تسمح بنفاذ كثافات استطاعية منخفضة اذ ان معدن اليورانيوم تتيغر بنيته البلورية عند 665 درجة مئوية . لا تستطيع هذه المفاعلات منافسة بعض المفاعلات الأخرى لأن هذه الكثافات الاستطاعية المنخفضة تؤدي الى بناء مفاعلات كبيرة جداً وبذلك فهي غير اقتصادية . بالاضافة الى ذلك فان معدن اليورانيوم سيتضرر جراء الانشطارات التي تحدث فيه مما يسبب من الناحية المعادنية تلفاً شديداً في مواد الوقود .

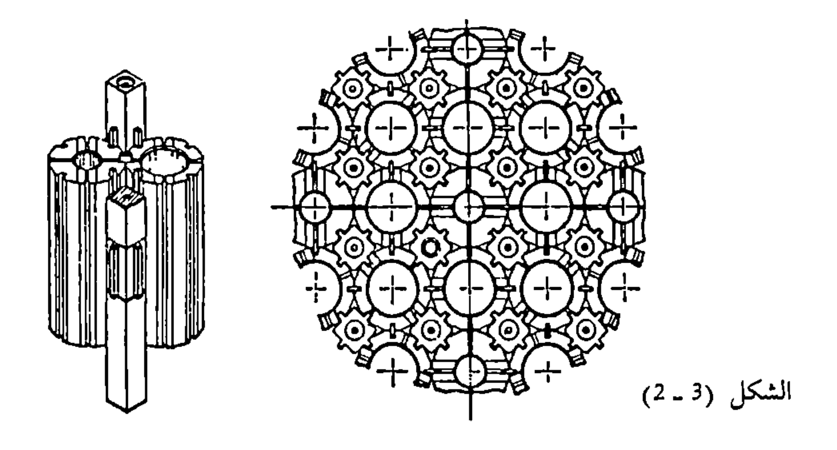
3 ـ 2 مفاعلات الغرافيت المتقدمة :

يمكن الحصول على كثافات استطاعية عالية باستعمال مواد وقود خزفية . وان مادة وقود مفاعلات الغرافيت المتقدمة هي بالتالي أوكسيد اليورانيوم التي تبلغ

حرارة ذوبانه 2800° C . وأوكسيد الأورانيوم هذا لا يتأثر بالأضرار الاشعاعية . أما الماغنوس فلا يستعمل كمادة تغليف بسبب الكثافة الاستطاعية العالية ، ولذلك فقد استُعْمِل بدلاً منه أغلفة من الفولاذ . وبما ان الغلاف الفولاذي يمتص كثيراً من النيترونات فلا بد من تخصيب مادة الوقود .

نشاهد في الشكل (3 ـ 2) ترتيب المهديء من الغرافيت في مفاعلات الغرافيت المتقدمة .

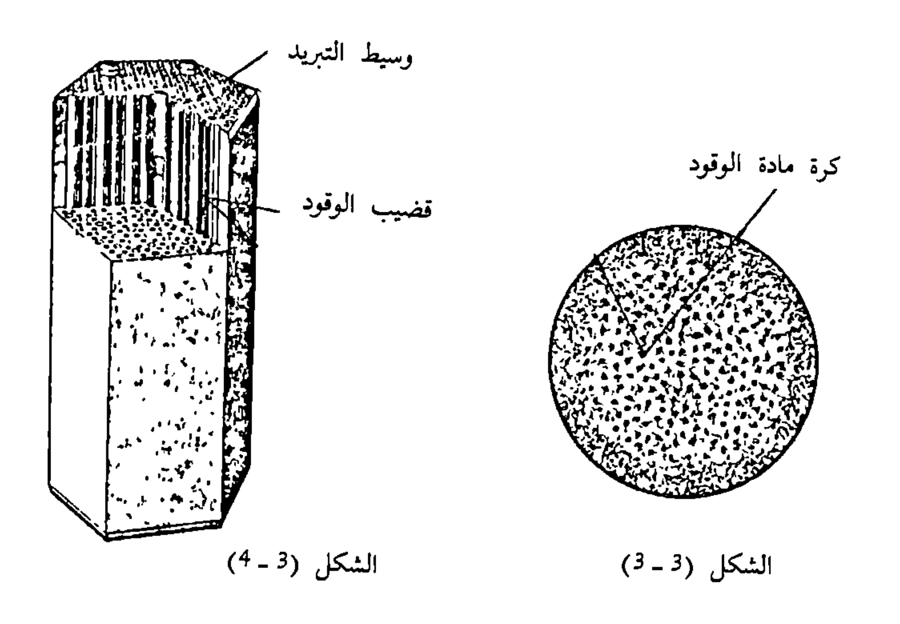
بدأ المفاعل البريطاني AGR عمله التجاري عام 1976 .



الشكل (3 ـ 2)

3 ـ 3 مفاعلات الحرارة العالية :

تستعمل مادة الوقود الخزفية على شكل كريات صغيرة يبلغ قطرها نصف مليمتر . تحاط هذه الكريات الصغيرة بطبقات عديدة من الغرافيت البيروليتي التي من خواصها ان توقف بشكل كاف نتاجات الانشطار الاشعاعية . توضع هذه الكريات الصغيرة في الغرافيت وتلصق فيه لتصبح مواد وقود . تعبأ مفاعلات الحرارة العالية بنوعين من عناصر مواد الوقود . يضغط مزيج من هذه الكريات والغرافيت ليكوِّن كريات لها حجم كريات لعبة المضرب . انظر الشكل (3 ـ 3) . أو ليكوِّن قضباناً توضَّع في كتل من الغرافيت وتستعمل كمواد وقود . انظر الشكل (3 ـ 4) .



الشكل (3 ـ 4)　　　　الشكل (3 ـ 3)

ان المفاعلات التي تستخدم عناصر الوقود هذه لا تحتوي عملياً على مواد بناء تمتص النيترونات وهي لذلك مفضلة من أجل توالد مواد انشطار جديدة . يمزج مع هذه الكريات الصغيرة كمواد وقود أوكسيد اليورانيوم المخصَّب عالياً بمادة التوريوم الخام .

ينتج بذلك عن التوريوم ، اليورانيوم 233 غير الموجود في الطبيعة . هذه المفاعلات تسمى بسبب ذلك مفاعلات التوريوم ذات الحرارة العالية .

ان مفاعلات الحرارة العالية التي لا تحتوي قلوبُها على معدن ، يمكنها العمل بدرجة حرارة تبريد غازي تبلغ 800 الى 1000 درجة مئوية .

يستعمل الهيليوم للتبريد وانه من الممكن ربط دارة التبريد مباشرة مع عنفة غازية .

يُؤمل الحصول بوساطة العنافات الغازية على مردود يبلغ 42 الى 43 بالمئة .

يُتابع تطوير مفاعلات الحرارة العالية في بريطانية والولايات المتحدة وسويسرا والمانيا الاتحادية .

3 ـ 4 مفاعل الماء الخفيف :

تسيطر حالياً في الولايات المتحدة والمانيا الاتحادية مفاعلات الماء الخفيف . وبما ان الماء الخفيف يمتص كثيراً من النيترونات يجب لذلك استعمال اليورانيوم المخصَّب كمادة وقود . ان مساويء استعمال الماء الخفيف كمهديء تكمن في انه كلما تزايدت درجة حرارة البخار في المفاعل كلما تزايد الضغط . وبما اننا نرغب دوماً في الحصول على درجة حرارة عالية فان المفاعل سيظل يخضع لضغط عال . (درجات حرارة عالية تعني مردود جيد) .

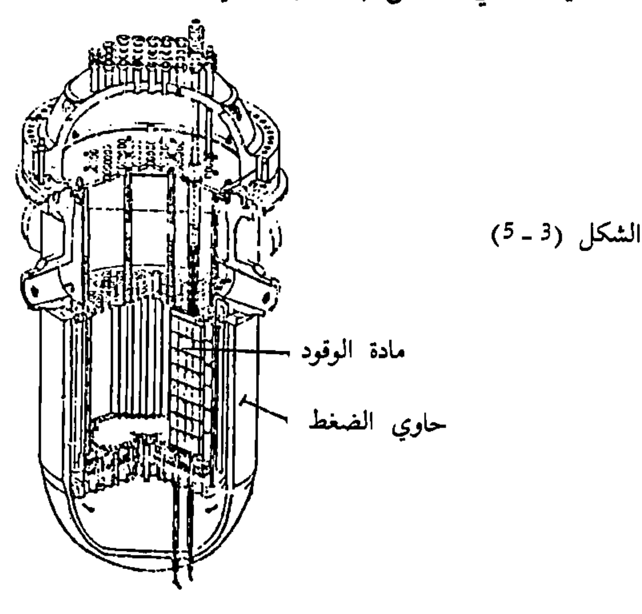
نميز نوعين من المفاعلات المبرَّدة بالماء الخفيف :

- مفاعلات الماء المضغوط .
- مفاعلات الماء المغلي .

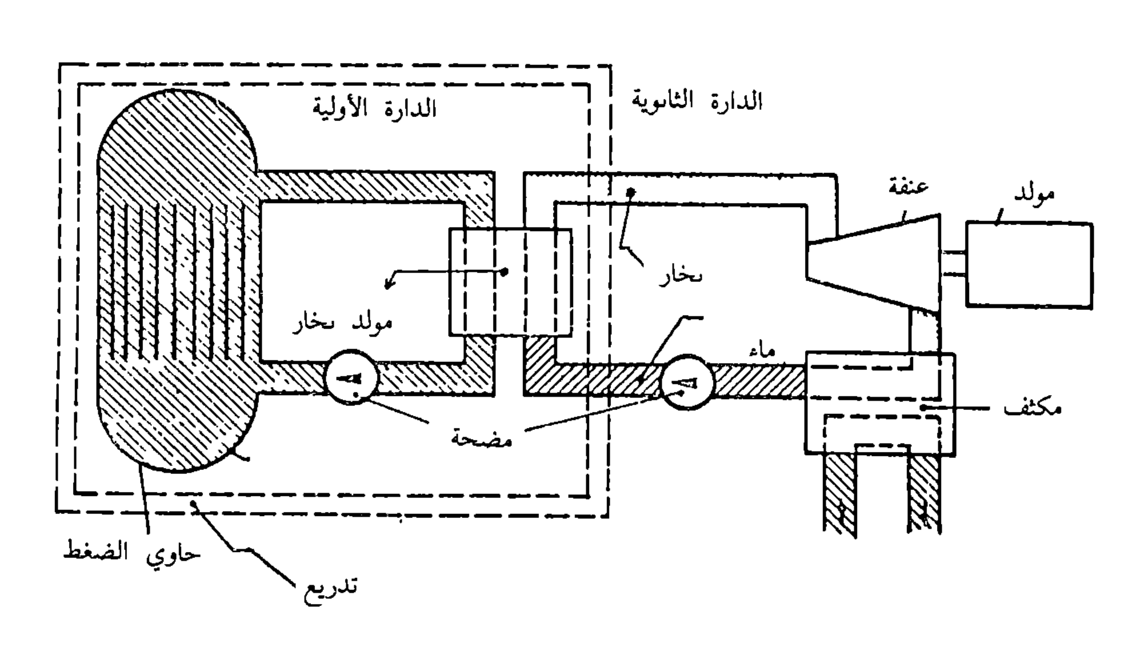
3 ـ 5 مفاعل الماء المضغوط :

يتضمن أساساً مفاعل الماء المضغوط مرجل ضغط ثابت (حاوي الضغط) مملوءاً بالماء الخفيف ثم قضبان الوقود التي هي عبارة عن أوكسيد اليورانيوم المخصَّب قليلاً ثم عناصر التحكم .

يشاهد في الشكل (3 ـ 5) حاوي الضغط والعناصر التي يحتوي عليها .



الشكل (3 ـ 5)


الدارة الأولية
الدارة الثانوية
عنفة
مولد
بخار
مولد بخار
ماء
مكثف
مضخة
حاوي الضغط
تدريع

الشكل (3 ـ 6)

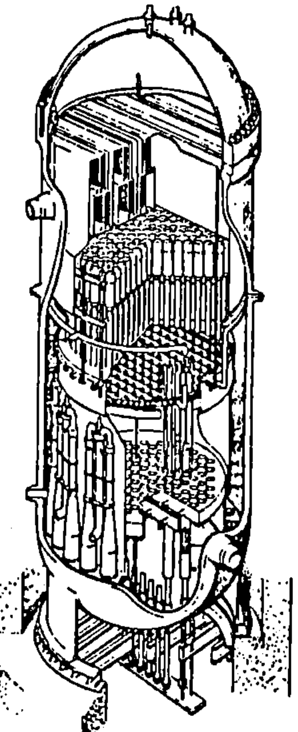
يتم ضخ الماء المسخن خلال مولد البخار وهناك يعطي الحرارة (الجزء الأولي) . ان الجزء الثانوي التقليدي يكون مربوطاً بالمحطة ، وكون مولد البخار موجوداً بين الدارة الأولية والثانوية فانه يشكل وسيلة حماية لدورة البخار الثانوية ضد نتاجات الانشطار المشعة .

يشاهد في الشكل (3 ـ 6) مخطط مفاعل الماء المضغوط .

3 ـ 6 مفاعل الماء المغلي :

يشبه مفاعل الماء المغلي مفاعل الماء المضغوط وهو أيضاً غير متجانس . ان مفاعل الماء المغلي يشكل مع المفاعل ومولد البخار وحدة بنيوية متكاملة . هذا يعني ان البخار يولد في المفاعل ويقاد مباشرة الى العنفة . يتم بذلك توفير مبدل الحرارة ونصبح دون حاجة لمكونات أو أجزاء من المفاعل للحصول على ضغوط عالية التي هي ضرورية لمفاعل الماء المضغوط .

يشاهد في الشكل (3 ـ 7) حاوي مفاعل الماء المغلي والمكونات التي يتضمنها .



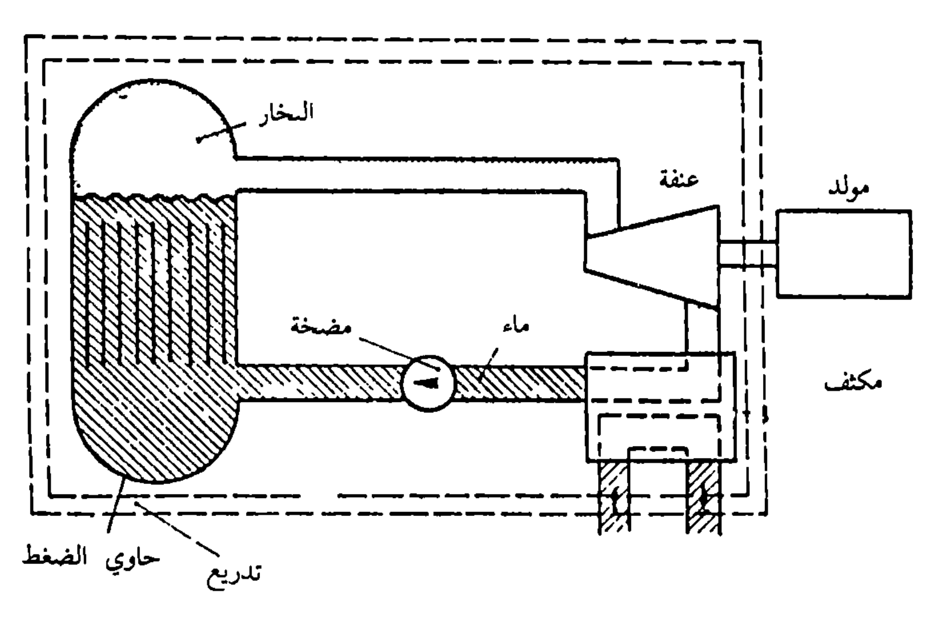
الشكل (3 ـ 7)

يعتبر حذف مبدل الحرارة محذوراً هاماً لأننا فقدنا بذلك حماية الدورة البخارية ضد نتاجات الانشطار المشعة . ان غلاف مواد الوقود هو غير موثوق للتحجيب ضد الاشعاع بالاضافة الى انه سيكون معرضاً للتآكل بسبب تشكيل فقاعات البخار .

تكمن ميزة مفاعل الماء المغلي في قدرته على التحكم بذاته جزئياً . فمثلاً اذا أصبحت درجة الحرارة في قلب المفاعل فجأة عالية جداً تتبخر بذلك كمية من الماء أكبر مما في المفاعل العادي ، والماء الذي هو مهدىء في الوقت ذاته يصبح متراخياً أي تقل كثافته جراء ظهور فقاعات البخار .

ان هذا التناقص الوسطي في كثافة المهديء يستمر في احداث اضطراب في التفاعل المتسلسل الى ان تسوَّى الحالة في قلب المفاعل مجدداً والى أَن توازِن عناصرُ التحكم هذا الاضطراب .

يشاهد في الشكل (3 ـ 8) مخطط مفاعل الماء المغلي .



الشكل (3 ـ 8)

3 ـ 7 مفاعل الماء الثقيل :

بما ان الماء الثقيل هو مهديء أفضل من الماء الخفيف ، فان اليورانيوم الطبيعي يمكن ان يستعمل كمادة وقود . وللأسف فان الماء الثقيل يرفع من كلفة تنفيذ هذه المفاعلات بسبب ثمنه المرتفع . في البلدان التي تمتلك مناجم أورانيوم مثل كندا والتي ليس لديها مصانع للتخصيب ، تبني محطات نووية مفاعلاتها تعمل باليورانيوم الطبيعي ويستعمل الماء الثقيل كمهديء . هناك نوعان من مفاعلات الماء الثقيل ، منها التي تستعمل حاويات الضغط والأخرى تستعمل أنابيب الضغط .

ان المفاعلات ذات حاوي الضغط لها مبدئياً ذات بنية مفاعلات الماء المضغوط . وللانقاص من كمية الماء الثقيل في هذه المفاعلات طورت أنابيب ضغط وبذلك تم الفصل بين وسيط التبريد والمهديء . وأما عناصر الوقود فتوضّع في أنابيب متوازية على شكل حزم تتدفق من حولها وسائط التبريد كالماء وثاني أوكسيد الفحم . يصبح التوفير في كمية النيترونات سيئاً باستعمال أنبوب الضغط ولذلك يجب استعمال أورانيوم مخصّب بكميات قليلة .

3 ـ 8 مفاعل التوالد السريع :

تمتلك المفاعلات السريعة التي وقودها هو البلوتونيوم 239 أفضل موازنة نيترونية . نتمكن بواسطة هذه المفاعلات توليد مواد انشطار جديدة ناجمة عن المادة الأم (أي اليورانيوم 238) أكثر مما يستهلك لدى التفاعل المتسلسل .

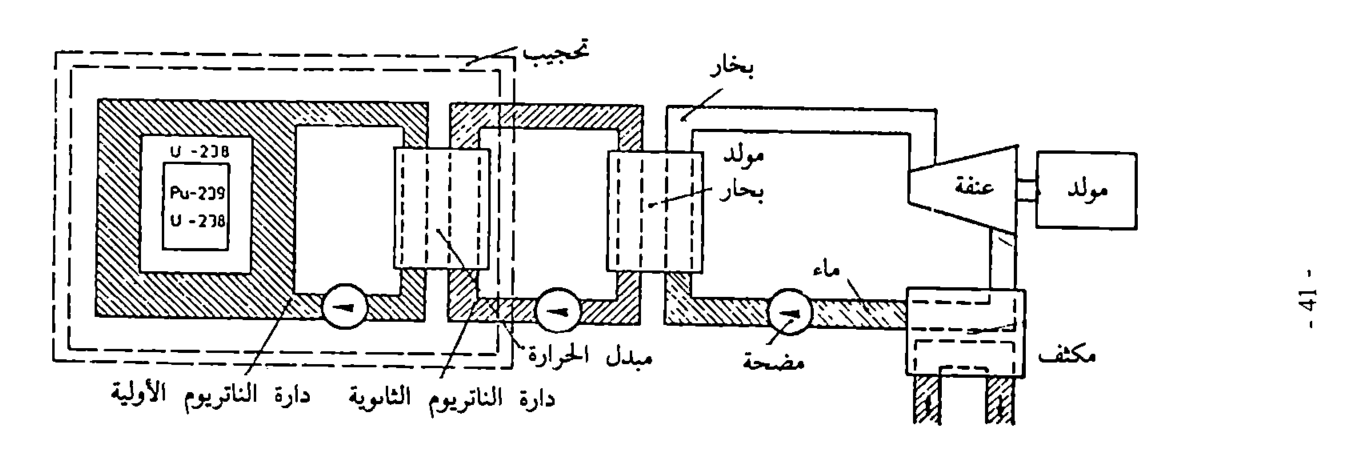
توضّع مادة الوقود التي هي عبارة عن مزيج من أوكسيد اليورانيوم وثاني أوكسيد البلوتونيوم على شكل قضبان في قلب المفاعل . وعوضاً عن العاكس يحاط قلب المفاعل بغلاف من اليورانيوم 238 يسمى غلاف التوالد . وبسبب كثافة استطاعتها العالية (ليس هناك مهديء) تحتاج هذه المفاعلات الى مبرد مليء الاستطاعة لا يعمل كمهدىء . ولتبريد هذه المفاعلات يستعمل الناتريوم السائل أو غاز الهيليوم .

ان المولدات السريعة المبردة بالصوديوم هي الأكثر نجاحاً وتطويراً من مفاعلات المحطات النووية الأخرى . لقد طوِّر منها في بعض البلدان لتعمل في

محطات توليد تبلغ استطاعتها الكهربائية 300 MW تقريباً . ان الصوديوم كمبرد في الدارة الأولية يسيل في قلب المفاعل الى مبدل الحرارة حيث يتخلى عن حرارته ومن هناك يعود الى قلب المفاعل بفعل الضخ . وفي الجهة الثانوية من مبدل الحرارة هناك أيضاً دارة جريان للصوديوم تقدم الحرارة المأخوذة الى مولد البخار . ان دارة الصوديوم الثانوية هي ضرورية لأسباب أَمْنية لأن الصوديوم في المفاعل يصبح مشعاً شديداً بالاضافة الى انه يتفاعل بقوة مع الماء .

ان تطويراً آخراً لمولدات الصوديوم هي مفاعلات التوالد السريعة المبردة بالهيليوم . في هذا المشروع تجري محاولة الجمع بين فائدة مادة الوقود في مفاعل التوالد وفوائد دارات التبريد لمفاعلات درجات الحرارة العالية . وبما ان هذه المولدات السريعة يمكنها استعمال احتياطي اليورانيوم الطبيعي بشكل واسع جداً ، فان جهوداً كبيرة تبذل لتطويرها وتصنيعها .

يشاهد في الشكل (3 ـ 9) مخطط مفاعل توالد سريع مبرَّد بالصوديوم .


تحجيب
بخار
U -238
Pu-239
U -238
مولد
بحار
عنفة
مولد
ماء
مكثف
مضحة
مبدل الحرارة
دارة الناتريوم الثانوية
دارة الناتريوم الأولية

الشكل (3 ـ 9)

الفصل الرابع

الدورة النيترونية

4 ـ التفاعل المتسلسل :

نأتي في هذه الفقرة على الوصف الكيفي للتفاعل المتسلسل الذي يحدث في مفاعل حراري يعمل باليورانيوم . لبلوغ هذا الهدف نناقش بدقة مصير عدد من النيترونات منذ نشوئها حتى اختفائها .

4 ـ 1 وصف التفاعل المتسلسل :

عندما تمتص مادة الوقود نيترونات ، فان جزءاً من هذه النيترونات يؤدي الى التفاعل (n,f) والباقي يؤدي الى التفاعل (n,γ) . تظهر بذلك فتونات فورية ونيترونات فورية ونتاجات انشطار . ان نتاجات الانشطار تحدث تحولات β^- ثم تنبعث بذلك الى جانب الالكترونات فتونات متأخرة ونيترونات متأخرة .

ان النيترونات الفورية «كالنيترونات المتأخرة» تظهر وجود طاقات تتراوح بين 2 MeV و 0,5 MeV . ان جزءاً ضئيلاً من هذه النيترونات السريعة يستطيع احداث انشطارات أخرى في اليورانيوم 238 واليورانيوم 235 . ذلك يؤدي الى ارتفاع بسيط في الانتاج النيتروني .

تكتبح النيترونات السريعة في المهديء بسبب التبعثر المرن وغير المرن . وجراء التبعثر غير المرن تظهر فوتونات متأخرة أخرى . في فترة الاكتباح عند الطاقة

0,025 eV ، يمكن لجزء من النيترونات ان ينفلت من النظام ولجزء آخر منها ان يستهلك في اليورانيوم 238 بفعل الأسر الطنيني .

تتبعثر النيترونات الحرارية بصورة مرنة وينفلت جزء منها من النظام وجزء آخر يمكن ان يمتص من قبل المواد ومن مواد الوقود (الأسر الطفيلي) .

أما الباقي من هذه النيترونات سيمتص من جديد من قبل مادة الوقود وهكذا تغلق الدارة النيترونية وتبدأ دارة أخرى نيترونية بعد ذلك بالنشوء وهكذا تستمر الدورة النيترونية .

التصرف الزمني :

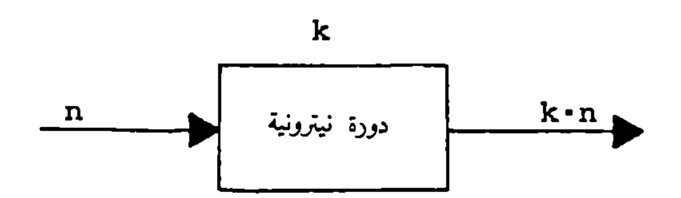
يحتاج نيترون فوري لأكمال دورة كاملة نيترونية في مفاعل مهدأ بالماء الى زمن قدره $10^{-4}s$. هذا الزمن يسمى فترة الحياة ويرمز إليه بـ ℓ .

يجب الأخذ بعين الاعتبار في مفاعل يعمل باليورانيوم أن 1% من مجمل النيترونات البطيئة تأتي متأخرة بنحو عشر ثوان . وان الزمن الوسطي لكي يكمل نيترون واحد الدورة النيترونية هو تقريباً 0,1 ثانية .

يحسب زمن الحياة الوسطي ℓ^* بسهولة بواسطة العلاقة :

$$\ell^* = 0,99.0,0001 \text{ s} + 0,01.(10 \text{ s}+0,0001 \text{ s}) = \underline{0,1 \text{ s}}$$

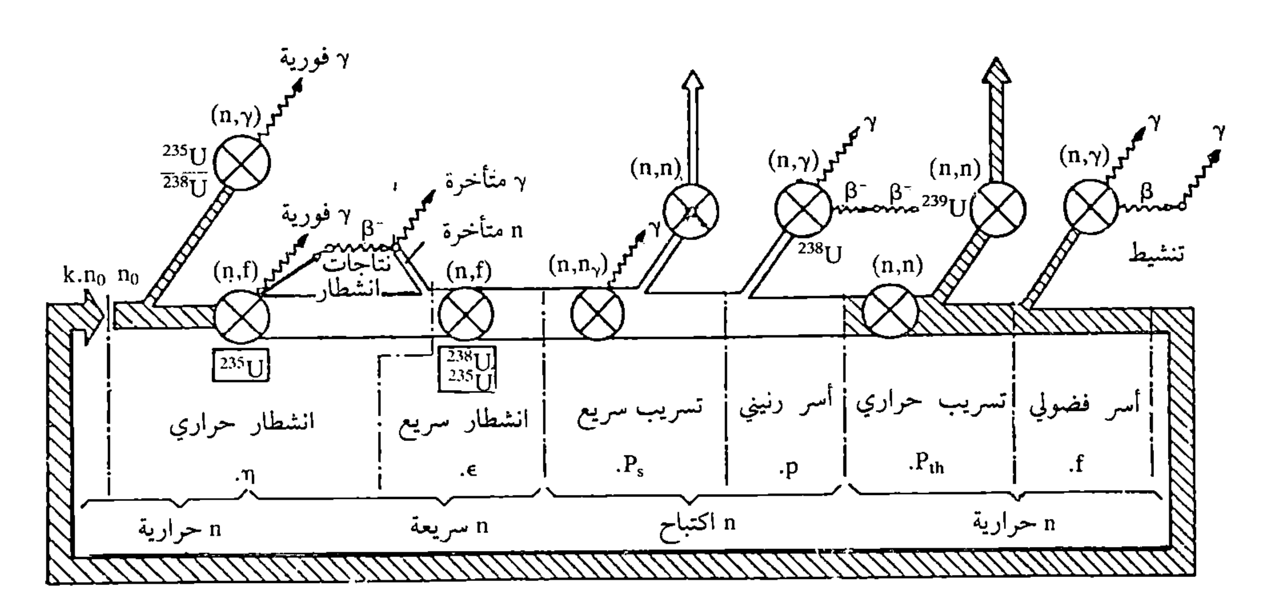
تشاهد في الشكل (4 ـ 1) الدورة النيترونية الكاملة .



4 ـ 2 عامل التكاثر :

اذا كان في المفاعل (دون منبع) عند بداية الدورة النيترونية وعند نهايتها ذات عدد النيترونات فسيكون عند نهاية الدورة النيترونية التالية ذات العدد من النيترونات . هكذا فان عدد النيترونات يبقى ثابتاً لا يتغير مع الزمن .

التفاعلات والاشعاعات في الدورة النيترونية للمفاعل
(مادة الوقود هي اليورانيوم)



الشكل (4 ـ 1)

تسمى حالة المفاعل هذه (الحالة الحرجة) . وإذا وجد عند نهاية الدورة عدد أكبر من النيترونات فان هذا العدد يتزايد في كل دورة نيترونية . يكون المفاعل في هذه الحالة (فوق الحرج) . وإذا وجد عند نهاية الدورة عدد أصغر من النيترونات فان هذا العدد يتناقص . يكون المفاعل في هذه الحالة (تحت الحرج) . لوصف تضخيم النيترونات لدى كل دورة نيترونية ، نعرف عامل التكاثر K . ان عامل التكاثر K هو نسبة عدد النيترونات عند نهاية الدورة الى عدد النيترونات عند بدايتها . لذلك فانه يعتبر عامل تضخيم .

$K > 1$: المفاعل فوق الحرج .

$K = 1$: المفاعل حرج .

$K < 1$: المفاعل تحت الحرج .

يعرَّف عامل التكاثر كالتالي :

$$K = \frac{\text{عدد النيترونات عند نهاية الدورة}}{\text{عدد النيترونات عند بداية الدورة}}$$

ان عامل التكاثر هو جداء عدة معاملات نأتي على كيفية حسابها في الفقرات التالية :

4 ـ 3 التفاعلية :

يستعمل لوصف حالة المفاعل الى جانب عامل التكاثر ما يسمى بالتفاعلية ρ التي تعرف بالعلاقة :

$$\rho = \frac{K-1}{K}$$

حيث :

ρ : التفاعلية [−]

K : عامل التكاثر [−]

وتستعمل أيضاً العلاقة :

$$\rho = \frac{\Delta K}{K}$$

في حالة $\rho>0$ يكون المفاعل فوق الحرج .
وفي حالة $\rho=0$ يكون المفاعل حرجاً .
وفي حالة $\rho>0$ يكون المفاعل تحت الحرج .
تصف التفاعلية ρ انحراف حالة المفاعل عن النقطة الحرجة . وكما يلاحظ من التعريف السابق فان التفاعلية هي بمثابة مقياس للتزايد النسبي في عدد النيترونات في كل دورة نيترونية .
وللتفاعلية أيضاً المعنى التالي :

$$\rho = \frac{\text{تزايد النيترونات خلال الدورة}}{\text{عدد النيترونات عند نهاية الدورة}}$$

ان التفاعلية هي عدد بحت ولكن يمكن التعبير عنها بنسبة مئوية ٪ أو بالميلّي كيلو أو بالمئة ألف $\rho[\%,mk,p.c.m]$:p.c.m .

1% = 0,01
1 mk = 0,001 (ميلّي كيلو = mk)
1 p.c.m=0,00001 (لمئة ألف)

مثال :

$\rho = 0,005 = 0,5\%$

$\rho = 0,0037 = 3,7\ mk$

$\rho = -0,15 = -15000\ p.c.m$

الفصل الخامس

5 ـ المعاملات الستة في عامل التكاثر :

ان الفيزيائي انريكو فيرمي هو الذي بنى أول مفاعل وقد حلل عامل التكاثر الى ستة معاملات نأتي على شرح كل منها في الفقرات الآتية .

5 ـ 1 مردود النيترونات :

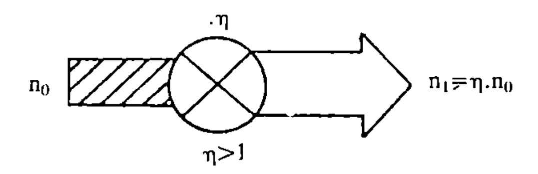
لنتناول الدورة النيترونية ثانيةً ولنفرض ان عدداً n_0 من النيترونات الحرارية يُمتص من قبل مادة الوقود . يُؤسر جزءٌ من هذه النيترونات من قبل اليورانيوم 238 و 235 بسبب التفاعلات (n,γ) والجزء الباقي منها يُحدث في اليورانيوم 235 تفاعلات تنتج نيترونات جديدة . يبلغ عدد النيترونات ν المنتجة في الانشطار الواحد 2,5 نيتروناً .

يعرف المردود النيتروني η كالآتي :

$$\eta = \frac{\text{عدد النيترونات السريعة الناتجة عن امتصاص النيترونات الحرارية}}{\text{عدد النيترونات الحرارية المُمْتَصة من قبل مادة الوقود}}$$

اذ أُمتص عدد n_0 من النيترونات في مادة الوقود ينتج عن ذلك عدد $n=\eta n_0$ من النيترونات السريعة الجديدة . فاذا شئنا الحفاظ على تفاعل متسلسل أو بعبارة

أخرى اذا أريد للتفاعل المتسلسل الاستمرار يجب على η ان يكون أكبر من واحد . $(\eta>1)$



ان المردود النيتروني يعتمد فقط على مادة الوقود في المفاعل ويحسب أيضاً من العلاقة :

$$\eta = \nu . \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}$$

η : مردود النيترونات [−]

ν ناتج الانشطار [−]

Σ_f : مقطع الانشطار لمادة الانشطار (cm^{-1})

Σ_a : مقطع الامتصاص لمادة الوقود (cm^{-1})

إذا أردنا حساب المردود النيتروني لمادة انشطار نقية نطبق العلاقة :

$$\eta = \nu . \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

σ_f : مقطع الانشطار لمادة الانشطار (cm^2) .

σ_a : مقطع الامتصاص لمادة الانشطار (cm^2) .

يشاهد في الجدول الآتي المردود النيتروني η من أجل الانشطار الحراري لمواد الانشطار النقية U-235 و Pu-239 بالاضافة الى اليورانيوم الطبيعي .

مادة الانشطار	ν	η
U-235	2,5	2,1
U-233	2,5	2,3
Pu-239	2,9	2,1
يورانيوم طبيعي	2,5	1,4

يجب الانتباه الى ان جودة مادة الوقود ، تحدد من قبل η بسبب التفاعلات $(n.\gamma)$ التي لا يمكن تجنبها ، وليس من قبل ν ، ولذلك فان اليورانيوم 235 هو مادة انشطار أفضل من Pu-239 بالنسبة للنيترونات الحرارية .

5 ـ 2 المردود النيتروني لليورانيوم :

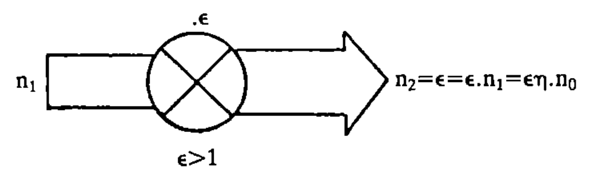
اذا كان الوقود هو اليورانيوم ، فان المردود η يتزايد مع تزايد التخصيب . وفي حالة تخصيب 100% (يورانيوم 235 نقي) يكون المردود $\eta=2{,}1$ و η هو دوماً أصغر من ν لدى تخصيب 100% لأنه في حالة اليورانيوم 235 ، هناك ضياع نيتروني بسبب التفاعل (n,γ) .

5 ـ 3 معامل الانشطار السريع :

ان جزءاً صغيراً من النيترونات السريعة يستطيع ان يولِّد في اليورانيوم 238 واليورانيوم 235 من خلال الانشطار ، نيترونات سريعة اضافية . في مفاعلات المحطات النووية التي وقودها مخصَّب في حدود 3% ، يسود الانشطار السريع في اليورانيوم 238 . ان تضخيم عدد النيترونات من خلال الانشطار السريع يؤخذ بعين الاعتبار بوساطة عامل الانشطار السريع ϵ الذي يعرف كالآتي :

$$\epsilon = \frac{\text{عدد نيترونات الانشطار السريعة الناتجة عن امتصاص النيترونات الحرارية والسريعة}}{\text{عدد نيترونات الانشطار السريعة الناتجة عن امتصاص النيترونات الحرارية}}$$

ينتج من خلال الانشطار الحراري عدد $n_1=\eta.n_0$ من النيترونات السريعة .
ان جزءاً ضئيلاً من هذه النيترونات يولّد من خلال انشطار سريع نيترونات سريعة اخرى . يوجد الآن في المفاعل عدد من النيترونات السريعة :
$n_2=\epsilon n_1=\epsilon\eta.n_0$



يكون الانشطار السريع في مفاعل حراري متجانس قليل الاحتمال جداً ولذلك فان معامل الانشطار السريع $\epsilon=1$. وفي مفاعل حراري غير متجانس ، فان ϵ يكون أكبر من الواحد بقليل . في مفاعل (ديوريت) السويسري فان $\epsilon=1,023$. وفي حالات خاصة يمكن اهمال الانشطار السريع . هذا يعني ان نضع $\epsilon=1$.

ان معامل الانشطار السريع ϵ يعتمد بشكل أساسي على مقدار هام بالنسبة لتصميم المفاعل وهو نسبة المهدىء الى الوقود . في مفاعل اليورانيوم المعتبر هنا والمهدأ بالماء فان هذا المقدار هو نسبة الماء الى اليورانيوم . تحدد هذه النسبة لدى تصميم المفاعل ، من خلال اختيار نصف قطر مواد الوقود أو من خلال أبعاد الشبكة .

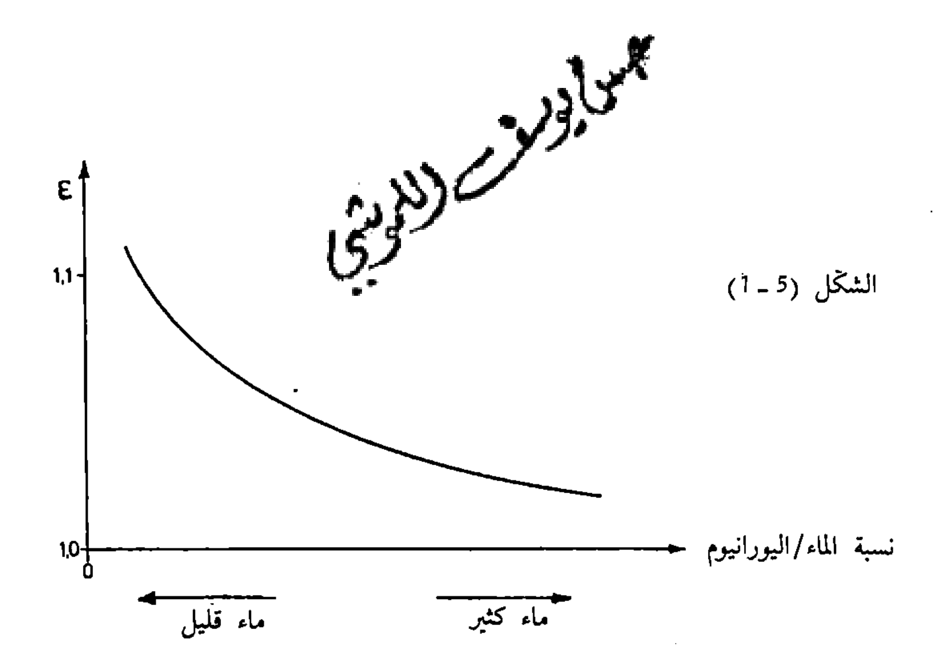
يكون المفاعل مهدأً بشكل جيد عندما تكون نسبة الماء الى اليورانيوم كبيرة (كثير من الماء) غير ان احتمال حدوث انشطار سريع يكون قليلاً . اما إذا احتوى المفاعل قليلاً من الماء فان احتمال الانشطار السريع يكون اكبر .

تتزايد قيمة معامل الانشطار لدى تناقص تركيز اليورانيوم . يشاهد في الشكل (5 ـ 1) منحني ϵ بدلالة نسبة الماء الى اليورانيوم .

قليل من الماء ← انشطارات سريعة كثيرة ← ϵ كبير

كثير من الماء ← انشطارات سريعة قليلة ← ϵ صغير

بسبب علاقة المقاطع الفعالة بالطاقة فان نوع مادة الانشطارات وأيضاً تخصيب مادة الوقود يلعبان دوراً هاماً .



الشكل (5 ـ أ)

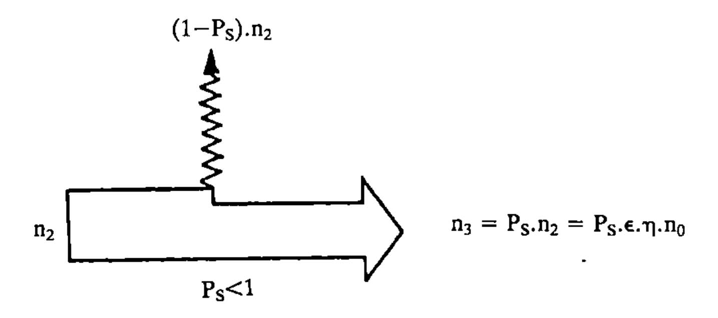
5 ـ 4 عامل البقاء السريع :

ينفلت جزء من النيترونات السريعة من النظام خلال الاكتباح وان عدد النيترونات المتبقي في المفاعل هو بالطبع أقل من عدد نيترونات الانشطار السريعة .

يؤخذ التنقيص من عدد النيترونات بسبب الضياع بعين الاعتبار بوساطة عامل البقاء P_S الذي يعرف كالآتي :

$$P_S = \frac{\text{عدد النيترونات السريعة التي لم تنفلت}}{\text{عدد النيترونات السريعة المولّدة}}$$

اذا احتوى المفاعل عدداً من النيترونات السريعة n_2 : $(\epsilon\eta n_0=n_2)$ ، فبعد الاكتباح لا يتبقى من هذه النيتروات الا عدد n_3 : $(n_3=P_S.n_2=P_S\epsilon\eta.n_0)$. يكون قد انفلت في هذه الحالة عدد من النيترونات يساوي $(1-P_S).n_2$.



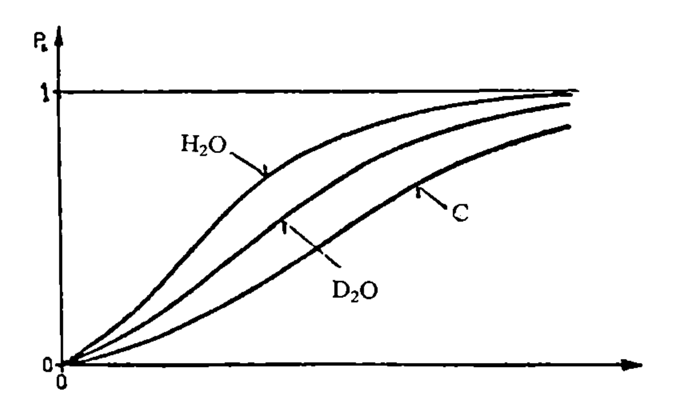
ان عامل البقاء السريع هو بالطبع دوماً أصغر من الواحد . يكون هذا العامل ، في مفاعل صغير أصغر بقليل من الواحد . ومع تزايد حجم المفاعل يقترب عامل البقاء السريع أكثر فأكثر من الواحد . يعتمد هذا العامل على هندسة المفاعل أي على حجمه وشكله ويعتمد أيضاً على مواد المفاعل أي على بنيته .

نحدد من خلال هندسة المفاعل مقداراً هاماً هو نسبة حجم المفاعل الى سطحه . في الواقع تكون هذه النسبة صغيرة لدى مفاعل صغير . وبما ان كثيراً من النيترونات تتواجد نسبياً على سطح المفاعل فان احتمالية الانفلات النيتروني تكون كبيرة في المفاعل الصغير . اما في مفاعل كبير فتكون هذه النسبة كبيرة واحتمالية الانفلات تكون صغيرة . يتزايد اذن عامل البقاء السريع P_s مع تزايد حجم المفاعل الى ان يصبح مساوياً للواحد .

يحدد مسار الاكتباح حسب نوع المهديء . فمثلاً يبلغ مسار الاكتباح في مهديء من الماء الخفيف ثلاثة عشر سنتيمتراً وفي مهديء من الغرافيت ثلاثة وأربعين سنتيمتراً . نلاحظ تلقائياً ان مسار اكتباح صغير يعني احتمالية انفلات نيتروني صغيرة .

لذلك فان عامل البقاء السريع P_s هو أكبر في مفاعل الماء الخفيف منه في مفاعل الماء الثقيل شريطة ان يكون للمفاعلين ذات القياس الهندسي .

يشاهد في الشكل (5 ـ 2) منحنى P_s بدلالة نصف قطر بعض المفاعلات الكروية . يكون الضياع من النيترونات بشكل عام في مفاعلات الماء الخفيف ضئيلاً ولذا يمكن اهمال الضياعات السريعة وجعل $P_s = 1$.



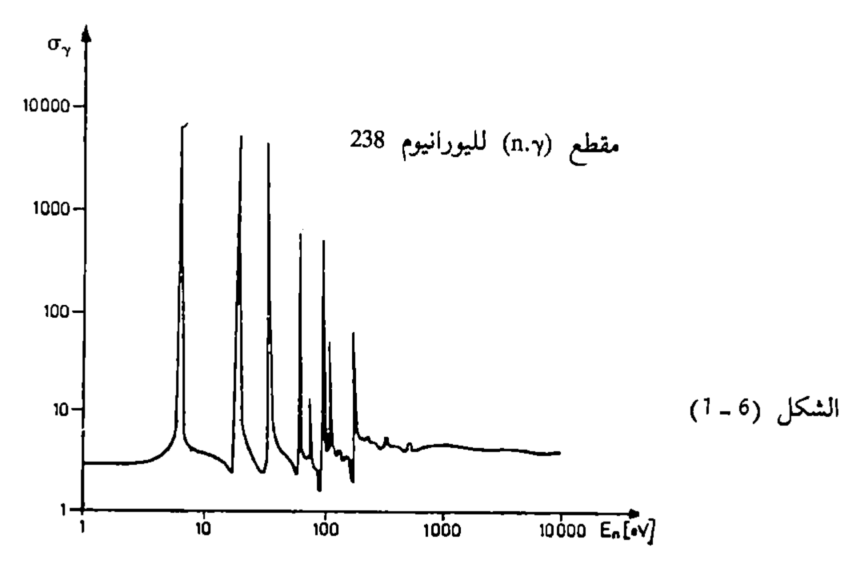
الشكل (5 ـ 2)

الفصل السادس

6 ـ معاملات عامل التكاثر الستة :

6 ـ 1 الانتفاع من الاكتباح :

يُظهر المقطع الفعال لبعض النويدات الثقيلة في مجال الالكترون فولط قمم رنين عالية . ان الأسر الرنيني لليورانيوم 238 يلعب دوراً هاماً في المفاعلات النووية . انظر الشكل (6 ـ 1) .



الشكل (6 ـ 1)

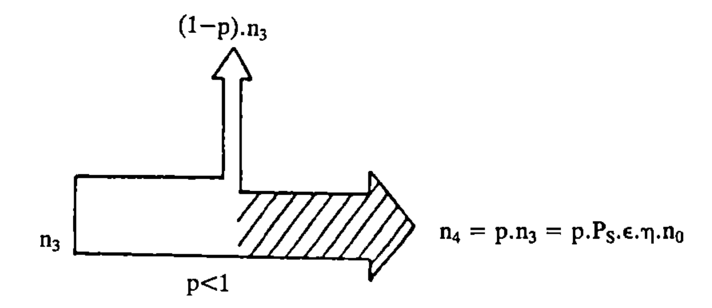
بينما تجوب النيترونات خلال الاكتباح جميع مجال الرنين ، يُؤسر جزء من هذه النيترونات ويعتبر بذلك ضائعاً بالنسبة للانشطار النووي . يؤخذ التنقيص من عدد النيترونات بسبب الأسر الرنيني بعين الاعتبار بوساطة الانتفاع من الاكتباح p الذي يعرف كالآتي :

$$p = \frac{\text{عدد النيترونات غير المأسورة قبل الرنين}}{\text{عدد النيترونات السريعة التي لم تنفلت}}$$

إذا تواجد في المفاعل عدد n_3 من النيترونات التي لم تنفلت فان عدد النيترونات n_4 غير المأسورة من قبل الرنين يعطى من العلاقة :

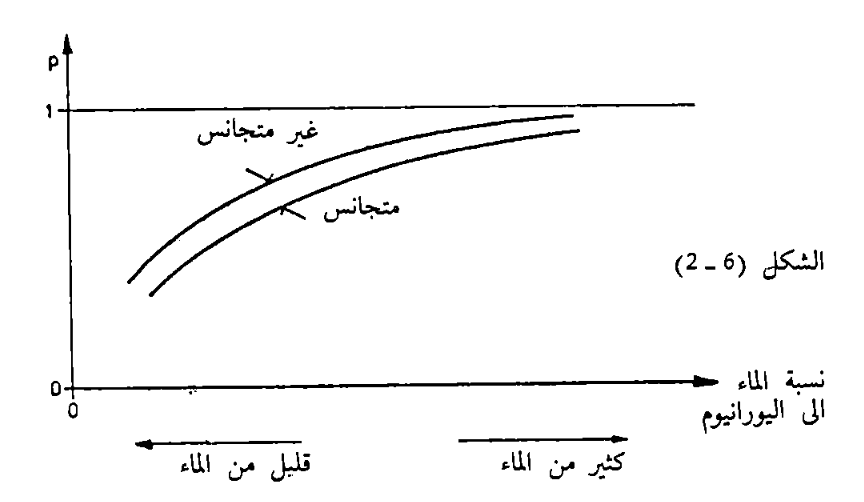
$$n_4 = p.n_3 = p.P_S.\epsilon.\eta.n_0$$

تُظهر هذه النيترونات الآن طاقة حرارية . يبلغ عدد النيترونات التي أسرت في مجال الرنين : $(1-p)n_3$.



ان الانتفاع من الاكتباح هو دوماً أصغر من الواحد وهو يعتمد بشكل أساس على نسبة الماء الى اليورانيوم في المفاعل . كلما احتوى المفاعل كمية من الماء أكبر كلما تعرضت النيترونات الى الاكتباح في المهديء ضمن مجال رنيني يتراوح بين سبعة ومئتين الكترون فولط . ينتهي الانتفاع من الاكتباح لدى تزايد نسبةٍ الماء الى اليورانيوم الى الواحد . بالاضافة الى انه أي الانتفاع يتأثر بكيفية توضُّع مواد الوقود وبالمهديء أيضاً .

يكون عامل الانتفاع ، في المفاعلات غير المتجانسة أكبر مما في المفاعلات المتجانسة لأن النيترونات تكتبح في المهديء وبذلك يتم انفلاتها في المفاعل غير المتجانس في قمم الرنين . انظر الشكل (6 ـ 2) .



الشكل (6 ـ 2)

يشاهد في الشكل (6 ـ 2) منحنى p بدلالة نسبة الماء الى اليورانيوم . وبالطبع يلعب كذلك تخصيب مادة الوقود دوراً . فبتزايد درجة التخصيب تتزايد قيمة p لتصبح مساوية للواحد .

6 ـ 2 معامل البقاء الحراري :

تتبعثر النيترونات الحرارية غالباً في المفاعل . يتبعثر جزءٌ منها الى خارج المفاعل ويعتبر بذلك فقداً بالنسبة للتفاعل المتسلسل الذي يلي .

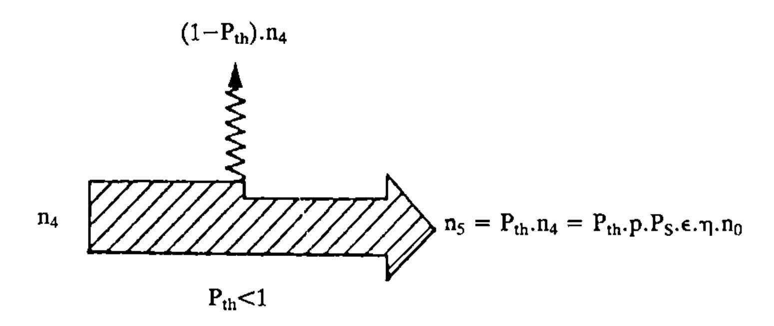
يُؤخذ الانتقاص من عدد النيترونات بسبب فقد النيترونات الحرارية بعين الاعتبار من خلال تعريف معامل البقاء الحراري P_{th} الذي يعطى بالعلاقة :

$$P_{th} = \frac{\text{عدد النيترونات الحرارية التي لم تنفلت}}{\text{عدد النيترونات الحرارية المنتجَة}}$$

ان عدد النيترونات الحرارية المنتجَة هو بالطبع مساوٍ لعدد النيترونات n_4 التي لم تؤسر من قِبَل الرنين . ان النيترونات الحرارية التي لم تنفلت تُمتَصُّ من قِبَل مواد المفاعل ، ويعطى عددها من العلاقة :

$$n_5 = P_{th}.n_4$$
$$= P_{th} \cdot p \cdot P_S.\epsilon.\eta.n_0$$

فعدد النيترونات التي انفلتت من المفاعل هو اذن : $n_4.(1 - P_{th})$

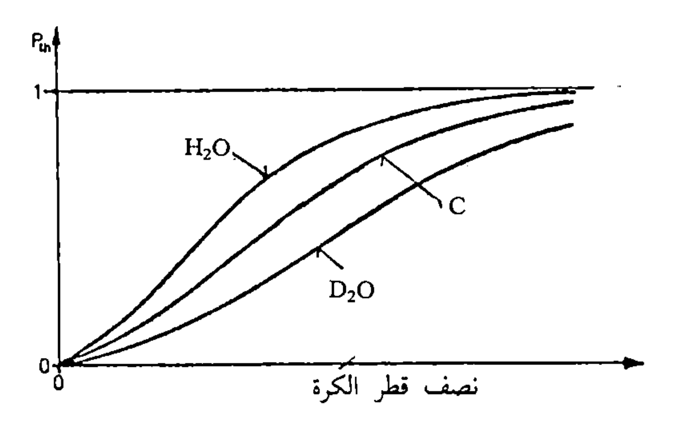


وبما انه لا بد من انفلات نيترونات حرارية من أي مفاعل فان P_{th} هو بالطبع دوماً أصغر من الواحد .

يعتمد معامل البقاء على بنية المفاعل أي على هندسة ومواد بنائه . وبسبب نسبة حجم المفاعل الى سطحه فان معامل البقاء الحراري صغير في المفاعلات الصغيرة . وبتزايد كبر المفاعل بتزايد قيمة P_{th} أكثر فأكثر الى ان تساوي الواحد . في مفاعل لا متناهي الكبر ، ليس هناك نيترونات ضائعة وعند ذلك $P_{th}=1$. بالاضافة الى ان المسار الذي يقطعه النيترون منذ نشوئه كنيترون حراري وحتى امتصاصه يلعب دوراً هاماً . تبلغ قيمة هذا المسار في مفاعلات الماء الخفيف 6 cm ، وفي مفاعلات الغرفيت 104 cm (C) ، وفي مفاعلات الماء الثقيل (D_2O) 340 cm . وبالطبع فان المسار القصير يعني احتمال انفلات صغير . ولذلك فان معامل البقاء الحراري P_{th} لدى المفاعلات التي لها ذات البنية الهندسية

هو أكبر في مفاعلات الماء الخفيف منه في مفاعلات الغرافيت وهو أصغر ما يكون في مفاعلات الماء الثقيل .

تشاهد في الشكل (6 ـ 3) منحنيات P_{th} من أجل مفاعلات الماء الخفيف والغرافيت والماء الثقيل .



الشكل (6 ـ 3)

6 ـ 3 الانتفاع الحراري :

تُمتص النيترونات الحرارية التي لم تنفلت من قبل مواد المفاعل ، هذا ما ذكرناه سابقاً . غير ان جزءاً من هذه النتيرونات يُمتَص من قبل مواد الوقود حيث تحدث انشطارات جديدة وبذلك تنشأ ذرية جديدة من النيترونات . أما النيترونات المتبقية فستُمتَصُ من قبل المهديء وعناصر التحكم ومواد بناء المفاعل وإنها تعتبر بذلك ضائعة من أجل احداث انشطارات أخرى (أسر طفيلي) .

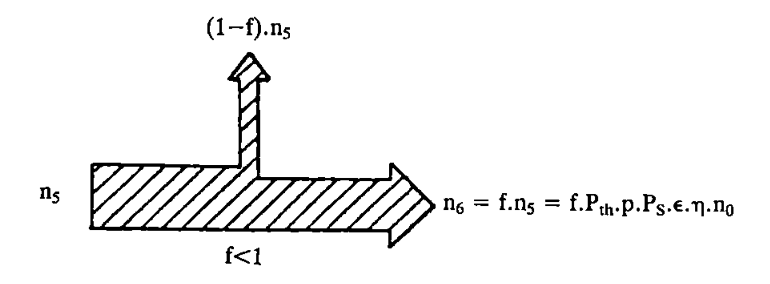
ان انقاص عدد النيترونات بسبب الأسر الطفيلي يُؤخذ بعين الاعتبار بوساطة الانتفاع الحراري f الذي يعرف كالآتي :

$$f = \frac{\text{عدد النيترونات الحرارية الممتصة في مواد الوقود}}{\text{عدد النيترونات الحرارية الكلية المُمْتَصة في المفاعل}}$$

إذا أُمتص في المفاعل عدد n_5 من النيترونات فان عدد النيترونات الممتصة من قِبَل مواد الوقود هو :

$$n_6 = f.n_5 = f.P_{th}.p.P_S.\epsilon.\eta.n_0$$

وبسبب الأسر الطفيلي يضيع عدد من النيترونات مساو لـ $n_5.(1-f)$.



ان الانتفاع الحراري هو بالطبع دوماً أصغر من الواحد $(f<1)$. يمكن بوساطة المواد الماصة مثل قضبان التحكم وحمض البور تغيير الانتفاع الحراري من خارج المفاعل . بذلك يتم التحكم بالانشطار النووي المتسلسل . ان الانتفاع الحراري f يعتمد على نسبة الماء الى اليورانيوم في المفاعل واذا احتوى هذا الأخير على كمية كبيرة من اليورانيوم ، فان احتمال الامتصاص في مادة الوقود يصبح كبيراً ولذلك فان f يتزايد مع تزايد تركيز اليورانيوم . الشكل (6 ـ 4) .

علاوة على ذلك فان توضيع مادة الوقود والمهديء يلعب دوراً . ففي المفاعل غير المتجانس يكون الانتفاع الحراري أصغر بقليل مما في المفاعل المتجانس لأن كثافة التدفق النيتروني الحرارية في مهديء المفاعل غير المتجانس ϕ_M أكبر مما في مادة الوقود ϕ_U .

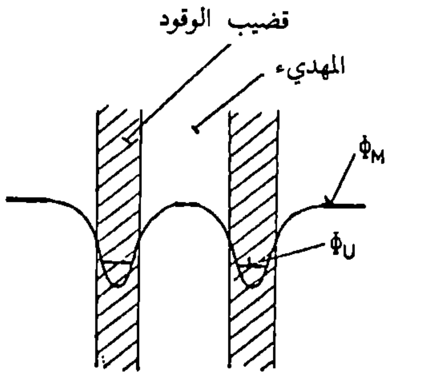
ينتج عن ذلك ان الامتصاص في المهدىء هو أيضاً أكبر .

ϕ_M : هي كثافة التدفق النيترني في المهديء .

ϕ_U : هي كثافة التدفق النيتروني في مادة الوقود .

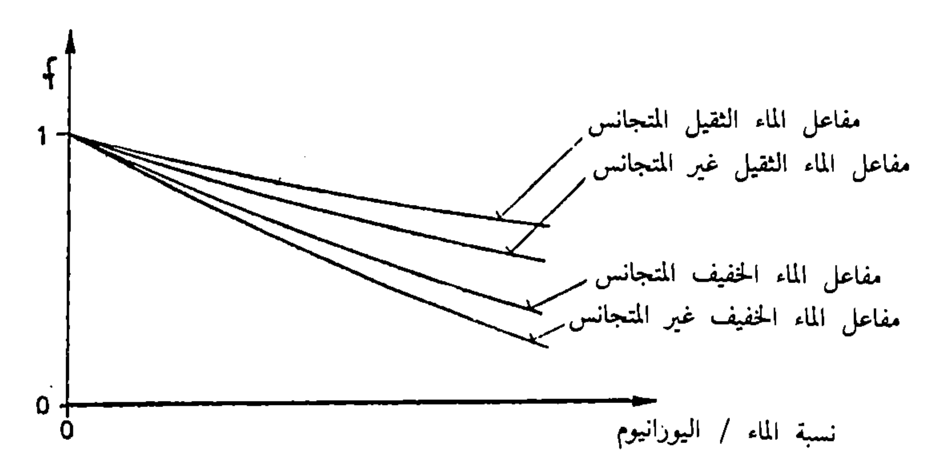
يتأثر الامتصاص في المهديء بنوعية هذا الأخير. ففي مفاعل الماء الثقيل يكون f أكبر مما في مفاعل الماء الخفيف .

وبما ان مقاطع الامتصاص تختلف باختلاف مادة الوقود فان f يعتمد على مادة الوقود وعلى أخصاب هذه المادة .



الشكل (6 ـ 4)

واذا كان الوقود هو اليورانيوم فان f يتزايد مع تزايد الأخصاب . في الشكل (6 ـ 5) تشاهد منحنيات f بدلالة نسبة الماء الي اليورانيوم .



الشكل (6 ـ 5)

الفصل السابع

7 ـ مناقشة حول الدورة النيترونية :

تحدِّدُ المعاملاتُ الستة $(\eta,\epsilon,P_S,p,P_{th},f)$ عاملَ التكاثر في المفاعل . نناقش في هذه الفقرة تأثيرات هذه المعاملات في بعضها البعض .

7 ـ 1 صيغة المعاملات الستة :

عند بداية دورة نيترونية يمتص عدد n_0 من النيترونات في مادة الوقود . وفي نهاية هذه الدورة يتبقى في المفاعل عدد n_6 من النيترونات بحيث :

$$n_6 = f.P_{th}.p.P_S.\epsilon.\eta.n_0$$

هذا العدد n_6 من النيترونات يُمتص من جديد في مادة الوقود وهكذا تغلق الدورة النيترونية . يشاهد في الشكل (7 ـ 1) مخطط رمزي لهذه الدورة .

ان عامل التكاثر K هو عبارة عن عامل تضخيم لعدد النيترونات للدورة الواحدة وانه يساوي الى جداء المعاملات الستة المنوه عنها أعلاه .

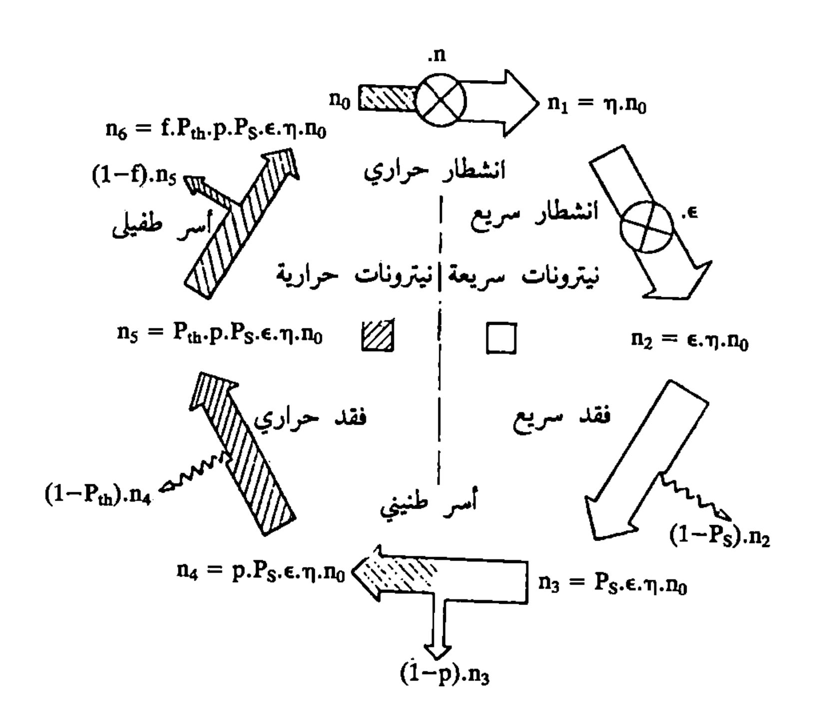
$$\boxed{K = \eta.\epsilon.P_S.p.P_{th}.f}$$

K : عامل التكاثر .

η : المردود النيتروني .

ϵ : معامل الانشطار السريع .

P_S : معامل البقاء السريع .
p : الانتفاع من الاكتباح .
P_{th} : معامل البقاء الحراري .
f : الانتفاع الحراري .



الشكل (7 ـ 1)

يمكن بوساطة عناصر التحكم (قضبان التحكم وحمض البور) التحكم بالانتفاع الحراري f . بذلك يتم التحكم من خارج المفاعل بعامل التكاثر K . وإذا كان للمفاعل ان يظل حرجاً فانه يجب اختيار f بحيث K=1 .

7 ـ 2 عامل التكاثر اللا متناهي :

ان المعاملات الستة وهي $f, p, \epsilon, \eta, P_s, P_{th}$ تتعلق ببنية المفاعل . يجري تحديد p, ϵ, η و f بوساطة مواد المفاعل فحسب : هندسة المفاعل لا تلعب أي دور . أما المقداران P_s و P_{th} فيعتمدان على مواد المفاعل وهندسته وهما يساويان بدقة الواحد لدى افتراض مفاهل لا متناهي الكبر . يرمز الى جداء المعاملات الأربعة الباقية بـ K_∞ :

$$K_\infty = \eta . \epsilon . p . f$$

يسمى K_∞ عامل التكاثر اللا متناهي وهو عديم الأبعاد . لدى مفاعل لا متناهي الكبر يكون K_∞ مساوياً الى عامل التكاثر K .

في حالة مفاعل عادي ، يعطى عامل التكاثر بالعلاقة :

$$K = K_\infty . P_S . P_{th}$$

إذا أريد للتفاعل المتسلسل الاستمرار ذاتياً والحفاظ على كيانه في مفاعل نووي ، يجب ان يكون هذا المفاعل حرجاً . هذا يعني :

$$K_\infty > 1 \leftarrow K = 1$$

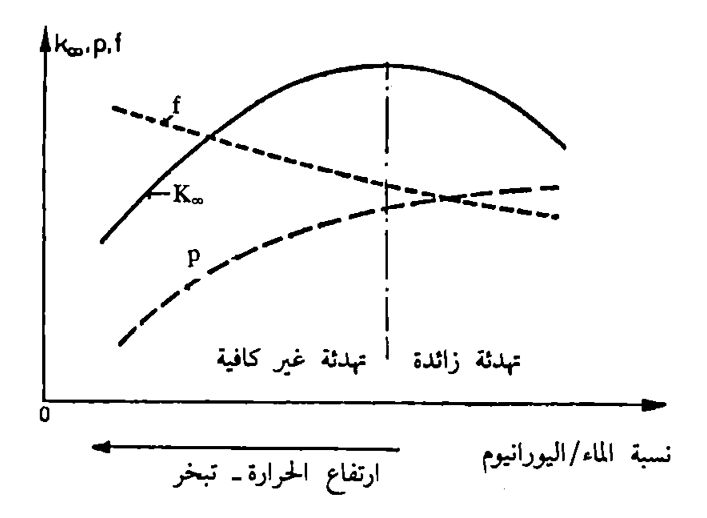
تصميم المفاعل :

ان الترتيب المادي والهندسي لمادة الوقود والمهديء أي ما يسمى بالبنية الشبكية ، يحدِّد بشكل وحيد عامل التكاثر اللا متناهي K_∞ . عندما يتم اختيار بنية شبكية في مفاعل ، يتحدد مسبقاً الكبر الحرج لهذا المفاعل . وبما ان قيمة K_∞ تحدَّد بشكل وحيد بوساطة البنية الشبكية فان الجداء $P_S . P_{th}$ يتحدد بسهولة ومعه يتحدد الكبر الحرج للمفاعل لدى جعل $K=1$.

عندما يكون كبر المفاعل معطى مسبقاً يجب عندئذ اختيار مواد المفاعل . يمكن في حالة بنية شبكية مناسبة تحديد الأخصاب الأصغري أي تحديد المردود النيتروني η الذي من أجله يصبح المفاعل حرجاً . وبما ان المردود النيتروني يتناقص إبان شغل المفاعل بسبب استهلاك مواد الانشطار فانه قد يحصل لدى تصميم المفاعل تجاوز المقدار الحرج أو الأخصاب الأصغري . لذلك تضاف مواد ماصة اضافية لرفع قيمة عامل التكاثر .

7 ـ 3 تأثير نسبة الماء الى اليورانيوم :

ان نسبة الماء الى اليورانيوم هي مقدار هام في تصميم المفاعل ، انها تؤثر في عامل التكاثر اللا متناهي K_∞ . وان المعاملين f, p يعتمدان بشدة على نسبة الماء الى اليورانيوم في المفاعل . في حالة ارتفاع نسبة الماء الى اليورانيوم فان المعامل p يتزايد بينما يتناقص المعامل f . وبما ان ϵ هو أكبر بقليل من الواحد و η مستقل عن نسبة الماء الى اليورانيوم فان K_∞ يتغير تناسبياً مع الجداء p.f . انظر الشكل (7 ـ 2) .



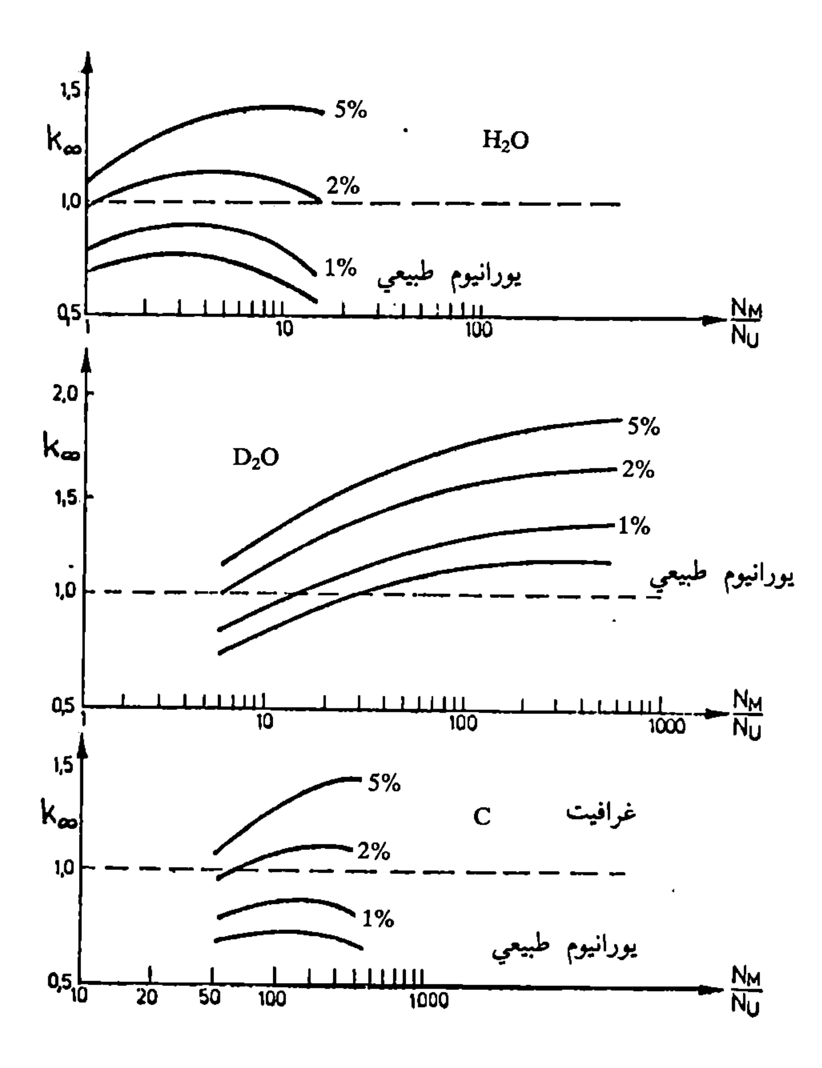
الشكل (7 ـ 2)

لذى أي مفاعل هناك قيمة أفضلية لنسبة الماء الى اليورانيوم تكون من أجلها قيمة المعامل K_∞ أعظمية . فإذا صغرت هذه النسبة يكون المفاعل مهدأ بشكل غير كاف وأما اذا كبرت هذه النسبة فان المفاعل يكون مهدأ أكثر من اللازم ، نقول انه فوق المهدأ .

ومن أجل أسباب أمنية فان المفاعل المهدأ بالماء يصمَّم لكي يظل دوماً تحت المهدأ بحيث انه في حالة التبخر وارتفاع درجة الحرارة يتناقص العامل K_∞ ويتراجع بذلك التفاعل المتسلسل ذاتياً (آمان ذاتي) . يشاهد في الشكل (7 ـ 3) منحنيات

K_∞ من أجل مزيج منتظم لمختلف اخصابات شديدة لليورانيوم مع المهدئات الثلاثة (H_2O, D_2O, C) .

في الشكل (7 ـ 3) توجد على المحور الأفقي نسبة مزيج نوى المهدىء الى نوى مادة الوقود N_M/N_U .

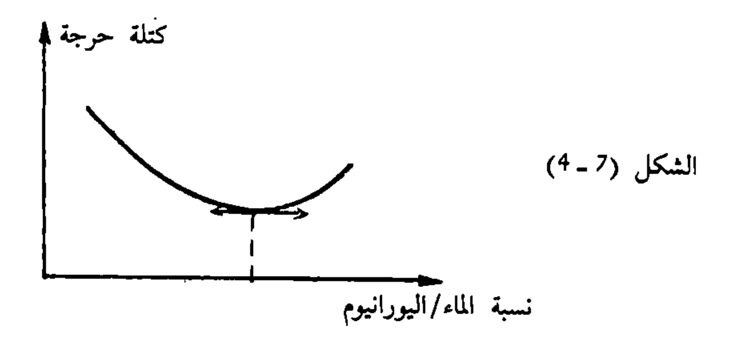


الشكل (7 ـ 3)

يتبين بوضوح من الشكل (7 ـ 3) ان مفاعل اليورانيوم الطبيعي المتجانس والمهدأ بالماء أو الغرافيت لا يمكن ان يصبح حرجاً لأن K_∞ في هذه الحالة لا يمكن ان يصل الى القيمة واحد .

7 ـ 4 الكتلة الحرجة :

يحتاج المفاعل لكي يصبح حرجاً الى كمية مواد انشطار أصغرية . هذه الكمية الأصغرية من مادة الوقود يطلق عليها اسم الكتلة الحرجة . لا تعتمد الكتلة الحرجة للمفاعل على نوع مادة الانشطار كاليورانيوم 235 أو البلوتونيوم 239 وانما تحدَّد مَن قبل كثير من العوامل . هكذا يحتاج مثلاً مفاعل سريع الى كمية حرجة تساوي خمسة وعشرين كيلوغراماً من اليورانيوم 235 بينما في مفاعل مكون من مزيج مناسب من الماء الثقيل و U-235 وعاكس فعال ، فان الكتلة الحرجة يجب ان تساوي تقريباً 200 g لكي يصبح المفاعل حرجاً . ان الكتلة الحرجة ستعتمد بالطبع على نسبة الماء الى اليورانيوم . وإذا كانت هذه النسبة أفضلية فان منحني الكتلة الحرجة يتمتع بقيمة أصغرية . انظر الشكل (7 ـ 4) .



الشكل (7 ـ 4)

ان توضع مادة الوقود والمهدىء له أيضاً تأثير على الكتلة الحرجة . فالتوضع غير المتجانس مقارناً مع التوضع المتجانس له انتفاع اكتباح أكبر وانتفاع حراري f أصغر .

وفي حالة حساب مناسب لقضبان الوقود ، فان تكبير المعامل p له تأثير أكبر مما لتخفيض المعامل f بحيث ان الكتلة الحرجة لتوضع غير متجانس هي أصغر

منها في توضع متجانس . هذا يؤدي الى أن مفاعلاً غير متجانس (لليورانيوم والغرافيت) يمكن تشغيله بينما ذلك سيكون مستحيلاً لدى مزيج متجانس .

ان مفاعل اليورانيوم الطبيعي المبرد بالماء الخفيف لا يمكن ان يصبح حرجاً في حالة توضع غير متجانس .

يؤثر العاكس أيضاً على الكتلة الحرجة . ان العاكس الفعال يمنع انفلات النيترونات السريعة والحرارية (P_s و P_{th}) ويقلل بذلك من قيمة الكتلة الحرجة .

الفصل الثامن

8 ـ الموازنة النيترونية :

يمكن حساب التصرف الزمني لعدد النيترونات في المفاعل بطريقة سهلة وذلك بوساطة الموازنة النيترونية . وللتنبؤ المسبق عن عدد النيترونات فانه يكفي معرفة عدد النيترونات عند زمن محدد ومعرفة تغيراته في بينة من الزمن . ان عدد النيترونات يتغير من خلال التفاعل المتبادل للنيترونات مع مواد المفاعل كالامتصاص والتبعثر . وإذا علم هذا العدد من التفاعل المتبادل أمكن وضع معادلة الموازمة النيترونية .

8 ـ 1 معادلة الموازنة النيترونية :

يعبر عن الموازنة بين النيترونات المولدة والضائعة بالمعادلة :

تغيُّر عدد النيترونات = الربح من النيترونات - الضياع منها

أو في بينة زمنية لدينا :

تغير عدد النيترونات في بينة زمنية = معدل الربح - معدل الضياع

يجري في هذه الفقرة حساب معدل الربح والضياع وبعد ذلك يتم وضع معادلة الموازنة للنيترونات .

8 ـ 2 معدل التفاعل :

لوصف معدل الربح والضياع نطبق مفهوم معدل التفاعل الذي يرمز اليه بـ RR والذي يدل على كمية التفاعلات النووية التي تحدث في بينة زمنية في مواد المفاعل .

نهتم في الفيزياء النووية بمعدل التفاعل الذي يحدث لدى عدد محدد N من النوى الذرية .

$$RR = \sigma.N.\phi$$

أما في فيزياء المفاعلات فيهمنا عدد التفاعلات النووية التي تحدث في حجم المفاعل V . $RR = \Sigma.V.\phi \; ; \; N = N^{\circ}.V \; ; \; \Sigma = \sigma.N^{\circ}$

يجب الانتباه هنا بان المقاطع العيانية Σ للمفاعل يجب ان تحدد من قبل مزيج من مختلف النويات :

$$\underset{(\text{مفاعل})}{\Sigma} = \sigma_1.N_1^{\circ} + \sigma_2.N_2^{\circ}$$

نعالج في علم تحريك المفاعلات التصرف الزمني لعدد النيترونات n . في هذه الحالة ان معدل التفاعل هو : $RR=v.\Sigma.n$.

حيث :

RR : معدل التفاعل .

v : سرعة النيترونات $[cm,s^{-1}]$ في مفاعل حراري .

Σ : المقطع العياني الفعال $[cm^{-1}]$.

n : عدد النيترونات [−] .

نحصل على هذه العبارة عندما نعوض في المعادلة $RR=\Sigma.V.\phi$ عن كثافة التدفق ϕ النيتروني بقيمتها $\frac{v.n}{V}$.

$$\phi = v.n^{\circ} = \frac{n}{V}.v$$

8 ـ 3 معدل الناتج :

يأتي الربح من النيترونات في مفاعل بصرف النظر عن المنابع النيترونية الخارجية من خلال الانشطار النووي .

اذا امتصت النيترونات من قبل مادة الوقود تحدث انشطارات الى جانب الأسر (n,γ) وان عدد الانشطارات التي تحدث في بينة زمنية في المفاعل يعطى من قبل معدل الانشطارات $RR_f=v.\Sigma_f.n$.

وبما انه ينتج عدد ν من النيترونات السريعة في الانشطار الواحد فان νRR_f يكون الربح من النيترونات السريعة في بينة زمنية .

$$\nu.RR_f = \nu.v.\Sigma_f.n$$

تستطيع هذه النيترونات السريعة احداث انشطارات اخرى (عامل الانشطار السريع ϵ) ويمكنها ايضاً ان تنفلت من المفاعل إبان الاكتباح (عامل البقاء السريع P_S) أو ان تمتص (انتفاع الاكتباح p) . وان الناتج من النيترونات الحرارية في بينة من الزمن أي ان معدل الناتج RR_P يعطى من العلاقة :

$$RR_P = \epsilon.P_S.p.\nu.v.\Sigma_f.n$$

ان المقدار $\epsilon.P_S.p.\nu$ يرمز اليه بـ ν_{eff} . فالمردود الانشطاري الفعال ν_{eff} يمثل المردود الانشطاري المتعلق بالمفاعل من أجل النيترونات الحرارية وبالطبع فانه دوماً أصغر من ν وبالتعويض لدينا :

$$RR_P = \nu_{eff}.v.\Sigma_f.n \ ; \ \nu_{eff} = \epsilon.P_S.p.\nu$$

نرمز الى المقدار $(\nu_{eff}.v.\Sigma_f)$ بـ $\mathcal{P}$ الذي يطلق عليه اسم احتمالية الناتج .
يعبر اذن عن معدل الناتج بالعلاقة :

$$RR_P = \mathcal{P}.n \ ; \ \mathcal{P} = \nu_{eff}.v.\Sigma_f$$

حيث :

RR_P : معدل الناتج $[s^{-1}]$
$\mathcal{P}$: احتمالية الناتج $[s^{-1}]$
n : عدد النيترونات $[-]$

ان معدل الناتج يتناسب مع عدد النيترونات n . أما احتمال الناتج $\mathscr{P}$ فيعتمد فحسب على بنية المفاعل (هندسة المفاعل ومواده) وهو بذلك يحتفظ بذات القيمة من أجل جميع الاعداد النيترونية .

8 ـ 4 معدل الامتصاص :

ان جزءاً من الضياع النيتروني سببه الامتصاص الذي يمكن ان يحدث في أي من مكونات المفاعل أو مواده . في كل تفاعل امتصاصي يضيع نيترون واحد . أما الضياع الناتج عن فقد النيترونات الحرارية في بينة زمنية فيعطى من معدل الامتصاص RR_A .

حيث :

$$RR_A = v.\Sigma_a.n$$

يرمز الى المقدار $(v.\Sigma_a)$ بـ $\mathscr{A}$ ويسمى احتمالية الامتصاص . يعطى معدل الامتصاص الآن بالعبارة :

$$RR_A = \mathscr{A}.n \; ; \; \mathscr{A} = v.\Sigma A$$

RR_A : معدل الامتصاص $[s^{-1}]$

$\mathscr{A}$: احتمالية الامتصاص $[s^{-1}]$

n : عدد النيترونات $[-]$

يتناسب معدل الامتصاص RR_A مع عدد النيترونات n في المفاعل . أما احتمالية الامتصاص $\mathscr{A}$ فتعتمد على مواد المفاعل وبذلك فانه يحتفظ بذات المقدار من أجل أي عدد من النيترونات .

يجب الملاحظة بانه لا يحدث في مادة الانشطار للمفاعل انتاج نيترونات فحسب وانما أيضاً امتصاص من النيترونات . (لأحداث انشطار واحد نحن بحاجة الى نيترون واحد) الذي يمتص ويعتبر بذلك ضائعاً .

ان مقطع الامتصاص العياني Σ_a لمادة الانشطار هو دوماً أكبر من مقطع الانشطار Σ_f لهذه المادة لأن $\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_\gamma$.

في حالة ارتفاع تركيز مادة الانشطار (مثلاً من خلال زيادة الأخصاب) يتزايد ليس Σ_f فحسب الذي يؤدي الى تزايد معدل الناتج RR_P وإنما أيضاً Σ_a الذي يؤدي الى تزايد معدل الامتصاص RR_A .

8 ـ 5 معدل الضياع أو الفقد :

تتحرك النيترونات الحرارية بسرعة عالية نسبياً في قلب المفاعل وتحدث في نوى ذرات مواد المفاعل تفاعلات تبعثر وان عدد التبعثرات التي تحدث في المفاعل في بينة زمنية تعطى من العلاقة التالية :

$$RR_S = v.\Sigma_S.n$$

حيث RR_S هو معدل التبعثر .

أما النيترونات التي تتحرك على حافة المفاعل فيمكن ان تتبعثر الى خارجه . ويشكل هذا التبعثر بالطبع فقداً نيترونياً .

أما الفقد من النيترونات الحرارية في بينة زمنية فيعطى من قبل معدل الفقد أو الضياع RR_L :

$$RR_L = \mathscr{L}.n \; ; \; \mathscr{L} = v.D.B^2$$

حيث :

v : سرعة النيترونات $[cm.s^{-1}]$

D : ثابتة الانتشار $[cm]$

B^2 : التحديب الهندسي $[cm^{-2}]$

RR_L : معدل الفقد $[cm^{-1}]$

$\mathscr{L}$: احتمال الفقد أو الضياع

n : عدد النيترونات $[-]$

فبدلاً من المقدار $v.\Sigma_S$ الذي يمثل احتمال حدوث تبعثر ، هناك المقدار $v.D.B^2$ الذي هو احتمال هروب أو انفلات نيترون واحد من المفاعل . ان انفلات نيترون واحد من المفاعل يعتمد من جهة بخاصية التبعثر (D) ومن جهة اخرى يعتمد على تكوين المفاعل (B^2) . ان معدل الفقد هو بالطبع أصغر بكثير من معدل

التبعثر لأنه في حالات قليلة فحسب يتمكن النيترون من الانفلات الى خارج المفاعل . وفي مفاعل لا متناهي الكبر يكون الفقد غير موجود .

ان معدل الفقد RR_L يتناسب مع عدد النيترونات في المفاعل بينما يعتمد احتمال الفقد $\mathscr{L}$ على بنية المفاعل فحسب وبذلك له ذات القيمة مهما كان عدد النيترونات .

ثابت الانتشار (أو التبعثر) :

ان ثابت الانتشار يعتمد فقط على خواص التبعثر لمواد المفاعل . وان D يساوي ثلث المسافة التي يقطعها نيترون حراري بدء من تبعثر الى التبعثر الذي يليه .

$$D = \frac{1}{3.\Sigma_S}$$

التحديب الهندسي :

ان التحديب الهندسي B^2 يعتمد فحسب على التكوين الهندسي للمفاعل أي كبره وشكله . من أجل المفاعلات الصغيرة فان B^2 يكون كبيراً (احتمال كبير ان ينفلت نيترون) ، ومن أجل المفاعلات الكبيرة فان B^2 يكون صغيراً (احتمال صغير ان ينفلت نيترون) . ومن أجل المفاعل اللا متناهي يكون التحديب الهندسي منعدماً $(B^2=0)$.

يحسب التحديب الهندسي من أجل مفاعل اسطواني بالعبارة التالية :

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{2,41}{r} \right)^2$$

h : هو ارتفاع الاسطوانة [cm]

r : هو نصف قطر الاسطوانة [cm]

8 ـ 6 معدل الدمار :

بما ان الامتصاص وكذلك الفقد يمثلان ضياعاً من النيترونات فانه من المعتاد تمثيلهما بعلاقة واحدة هي معدل الدمار RR_D الذي يعطى بالعلاقة :

$$RR_D = RR_A + RR_L$$

$$\mathcal{D}.n = \mathcal{A}.n + \mathcal{L}.n$$

$$RR_D = \mathcal{D}.n \; ; \; \mathcal{D} = v.\Sigma_a + v.D.B^2$$

حيث :

RR_D : معدل الدمار $[s^{-1}]$

$\mathcal{D}$: احتمال الدمار $[s^{-1}]$

n : عدد النيترونات

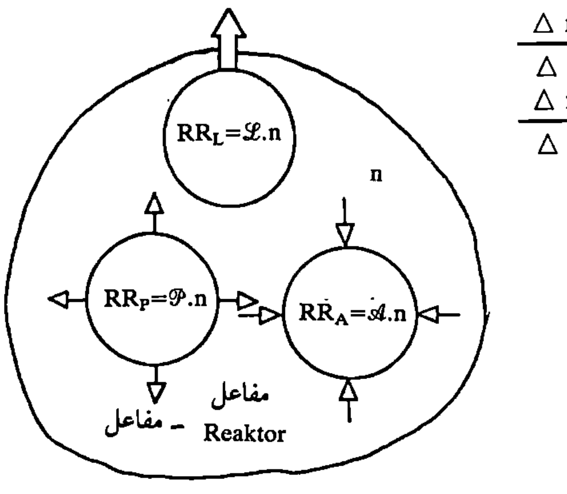
ان معدل الدمار يتناسب مع عدد النتيرونات n في المفاعل . وان احتمال الدمار $\mathcal{D}$ يأخذ بعين الاعتبار كامل الفقد النيتروني . أمّا $\mathcal{D}$ فيعتمد على بنية المفاعل فقط وله ذات القيمة مهما كان عدد النيترونات .

8 ـ 7 معادلة الموازنة :

نستطيع بوساطة معدل الناتج RR_P ومعدل الدمار RR_D وضع معادلة الموازنة للنيترونات في المفاعل .
هذه المعادلة تكتب كالتالي :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = RR_P - RR_D$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \mathcal{P}.n - \mathcal{D}.n$$



الشكل (8 ـ 1)

تغير عدد النيترونات لبينة من الزمن = معدل الربح - معدل الفقد

إن معادلة الموازنة البسيطة هذه هي سارية المفعول بشكل محدود ويمكن بوساطتها معالجة حالات المفاعل التي فيها لا يطرأ تغير في عدد النيترونات .

أما إذا تغير عدد النيترونات فإننا نضطر الى التمييز بين النيترونات الفورية والنيترونات المتأخرة .

سنعالج معادلة الموازنة العامة في الفصل العائد الى المفاعل في مجال الاقلاع .

الفصل التاسع

9 ـ مقادير التحريك الأساسية :

تم في الفقرة السابقة ادخال مفهوم احتمال الناتج $\mathscr{P}$ واحتمال الدمار $\mathscr{D}$. وبوساطة هاتين القيمتين يمكن وصف بنية المفاعل تماماً . ومن المعتاد ان نستعمل بدلاً من هاتين القيمتين قيماً أساسية كفترة الحياة وعامل التكاثر وزمن التوالد والتفاعلية . نناقش تباعاً العلاقة بين القيم الأساسية التحريكية هذه والقيم $\mathscr{P}$ و $\mathscr{D}$.

9 ـ 1 فترة الحياة :

ان فترة الحياة ويرمز إليها بـ ℓ هو الزمن الذي يستغرقه نيترون واحد لكي يستكمل دورة نيترونية كاملة . طيلة هذا الزمن تفقد جميع النيترونات التي كانت موجودة في بداية الدورة النيترونية . إما ان تمتص داخل المفاعل أو تنفلت منه وهكذا يمكن ان نعرِّف فترة الحياة ℓ كالتالي :

ان فترة الحياة ℓ هو الزمن الذي تفقد خلاله جميع النيترونات التي كانت موجودة في المفاعل عند بداية الدورة النيترونية وذلك بالامتصاص أو بالفقد .

لنفترض ان عدداً n_0 من النيترونات كان موجوداً في بداية الدورة النيترونية . وبما انه يفقد عدد $\mathscr{D}.n_0$ منها خلال بينة من الزمن فان الفقد النيتروني طيلة زمن الحياة ℓ يكون $\mathscr{D}.n_0.\ell$.

وبموجب تعريف فترة الحياة أو زمن الحياة فان عدد النيترونات $\mathcal{D}.n_0.\ell$ يساوى عدد النيترونات n_0 الذي كان موجوداً في البداية .

إذن :

$$\mathcal{D}.n_0.\ell = n_0 \rightarrow \ell = \frac{1}{\mathcal{D}}$$

ℓ : زمن الحياة [s]

$\mathcal{D}$: احتمال الدمار [s^{-1}]

9 ـ 2 زمن التوالد :

تختفي جميع النيترونات خلال الدورة النيترونية بسبب الامتصاص والفقد غير انه تتوالد بسبب الانشطار نيترونات جديدة . ويمضي زمن محدد كيما يتوالد عدد من النيترونات بسبب الانشطار مساوٍ لعدد النيترونات التي كانت موجودة في بداية الدورة النيترونية .

هذا الزمن يسمى زمن التوالد ويرمز إليه بـ $\wedge$.

اذا كان عدد n_0 من النيترونات موجوداً في بداية الدورة النيترونية فانه يتوالد في بينة من الزمن عدد من النيترونات يساوي $\mathcal{P}.n_0$ وخلال زمن التوالد يتوالد بالطبع عدد من النيترونات يساوي $\mathcal{P}.n_0.\wedge$. وبموجب تعريف زمن التوالد فان العدد $\mathcal{P}.n_0.\wedge$ من النيترونات يساوي عدد النيترونات n_0 الذي كان موجوداً في البداية :

إذن :

$$\mathcal{P}.n_0.\wedge = n_0 \rightarrow \wedge = \frac{1}{\mathcal{P}}$$

$\wedge$: زمن التوالد [s]

$\mathcal{P}$: احتمال الناتج [s^{-1}]

ان زمن التوالد يتناسب عكساً مع احتمال الناتج $\mathcal{P}$. على عكس زمن الحياة فان زمن التوالد لا تؤثر فيه عناصر التحكم وهو بذلك ثابت في كثير من حالات عمل المفاعل . لهذا السبب يكون من المفيد الابقاء على زمن التوالد في معادلة الموازنة .

بالتعويض عن $\mathscr{P}$ بقيمته نحصل على :

$$\wedge = \frac{1}{\nu_{eff}.v.\Sigma_f}$$

يتناسب زمن التوالد عكساً مع كثافة مادة الانشطار في المفاعل ويبلغ هذا الزمن في المفاعلات المهدأة بالماء تقريباً $10^{-4}.s$.

مثال : كم يبلغ زمن التوالد لمفاعل فيه مقطع الانشطار العياني $\Sigma_f=0,04$ علماً بان $\nu_{eff}=2,0$.

$$\wedge = \frac{1}{\nu_{eff}.v.\Sigma_f} = \frac{1}{2,0.2,2.10^5\ cm.s^{-1}.0,04} = 5,68.10^{-5}\ s$$

9 ـ 3 عامل التكاثر :

لقد عرف عامل التكاثر في الفقرات السابقة .

ليكن n_0 عدد النيترونات الموجودة في بداية الدورة النيترونية . وخلال هذه الدورة يفقد عدد من النيترونات مساوٍ لـ $\mathscr{D}.n_0\ell$. بينما يتوالد عدد من النيترونات مساوٍ لـ $\mathscr{P}.n_0.\ell$.

ان عدد النيترونات الموجودة في نهاية الدورة يمكن تحديده كالآتي :

$$n_1 = n_0 - \mathscr{D}.n_0.\ell + \mathscr{P}.n_0.\ell = K.n_0$$

بالاستناد الى تعريف زمن الحياة : $\mathscr{D}.n_0.\ell = n_0$

يمكن تبسيط العلاقة السابقة كالآتي :

$$\mathscr{P}.n_0.\ell = K.n_0$$

$$K = \mathscr{P}.\ell \rightarrow K = \frac{\mathscr{P}}{\mathscr{D}}$$

حيث :

K : عامل التكاثر

$\mathscr{P}$: احتمال الناتج

$\mathscr{D}$: احتمال الدمار .

ان عامل التكاثر هو اذن نسبة الربح النيتروني $\mathscr{P}$ بسبب الانشطار الى الضياع النيتروني $\mathscr{D}$ بسبب الامتصاص والفقد .

9 ـ 4 التفاعلية :

عرفت التفاعلية ρ سابقاً بالعلاقة :

$$\rho = \frac{K-1}{K}$$

يعوض عن K بقيمتها $\frac{\mathscr{P}}{\mathscr{D}}$ فنحصل على :

$$\rho = \frac{\mathscr{P}-\mathscr{D}}{\mathscr{P}}$$

حيث :

ρ : التفاعلية [−]

$\mathscr{P}$: احتمال الناتج .

$\mathscr{D}$: احتمال الدمار .

تظهر غالباً إبّان عمل المفاعل اضطرابات في الحالة الحرجة . تحسب التفاعلية بسهولة لدى المفاعلات التي يطرأ عليها اضطراب في الفقرات اللاحقة .

نعوض عن $\mathscr{P}$ و $\mathscr{D}$ بقيمتها في علاقة التفاعلية السابقة نحصل على :

$$\rho = \frac{\nu_{eff}.\Sigma_f - \Sigma_a - D.B^2}{\nu_{eff}.\Sigma_f}$$

تعتمد التفاعلية ρ كما هو واضح من المعادلة السابقة على بنية المفاعل .

9 ـ 5 وصف لحالة المفاعل :

يمكن وصف حالة المفاعل اما بواسطة احتمالات التفاعل $\mathscr{P}$ و $\mathscr{D}$ أو بوساطة المقادير الأساسية التحريكية k و ℓ أو من خلال التفاعلية ρ و $\wedge$. وبمساعدة عنصر

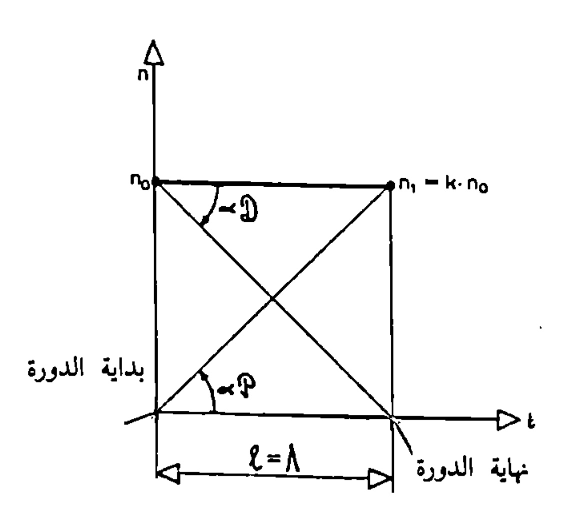
التحكم (قضبان التحكم أو حمض البور) نستطيع التأثير على المفاعل بوسائل خارجية . في الواقع ، لدى توضع محدد لعناصر التحكم يمكن تغيير المقادير $\ell,k,\mathscr{D}$ و ρ بينما تظل المقادير $\mathscr{P}$ و ∧ محافظة على قيمها بدقة .

الحالة الحرجة :

يكون المفاعل حرجاً أو يسمى حرجاً عندما يكون عدد النيترونات الناتج عن الانشطار مساوياً لعدد النيترونات الضائعة بسبب الامتصاص والفقد .

مفاعل حرج :
$$\begin{cases} RR_P = RR_D \\ \mathscr{P} = \mathscr{D} \end{cases}$$

في حالة المفاعل الحرج لدينا :
$$\begin{cases} K=1,\ \rho=0 \\ \wedge = \ell \end{cases}$$



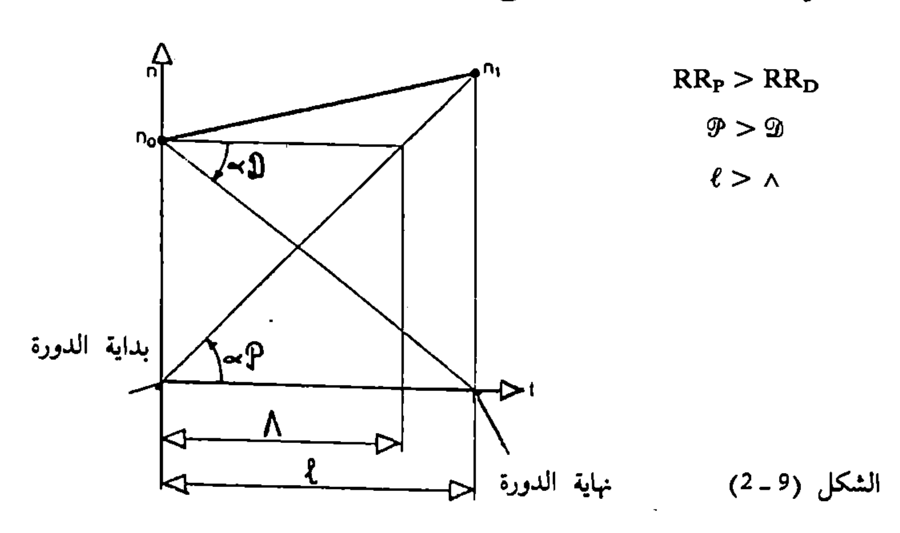
الشكل (9 ـ 1)

الحالة فوق الحرجة :

يسمى المفاعل فوق الحرج عندما يكون عدد النيترونات المولدة بالانشطار أكبر من عدد النيترونات الضائعة بسبب الامتصاص والفقد .

مفاعل فوق الحرج :

في حالة المفاعل فوق الحرج لدينا :



$$RR_P > RR_D$$

$$\mathscr{P} > \mathscr{D}$$

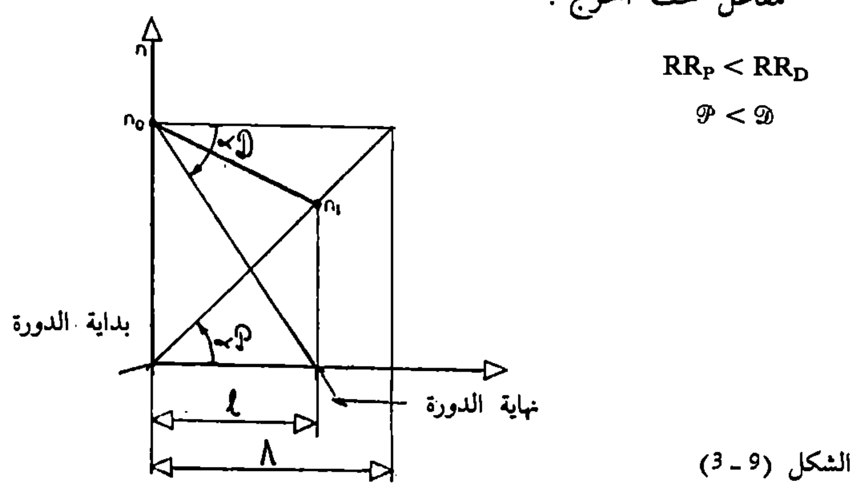
$$\ell > \Lambda$$

الشكل (9 ـ 2)

الحالة تحت الحرجة :

يكون المفاعل في حالة تحت الحرجة عندما يولد عدد من النيترونات في الانشطار أقل مما يفقد بسبب الامتصاص والفقد .

مفاعل تحت الحرج :



$$RR_P < RR_D$$

$$\mathscr{P} < \mathscr{D}$$

الشكل (9 ـ 3)

في المفاعل تحت الحرج لدينا : $\ell < \wedge$

9 ـ 6 معادلة الموازنة التحريكية :

ان معادلة الموازنة النيترونية لمفاعل نووي هي :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \mathscr{P}.n - \mathscr{D}.n = (\mathscr{P}-\mathscr{D}).n$$

انه من الأفضل تبديل $\mathscr{P}$ و $\mathscr{D}$ بـ ρ و $\wedge$ في معادلة الموازنة النيترونية .

بذلك نحصل على العلاقة :

$$\mathscr{P} - \mathscr{D} = \frac{\rho}{\wedge}$$

بالتعويض في معادلة الموازنة النيترونية لدينا :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{\rho}{\wedge}.n$$

ان كتابة المعادلة السابقة بدلالة ρ و $\wedge$ هي المفضلة لأن زمن التوالد $\wedge$ يعتمد فحسب على كثافة مادة الانشطار ولا يتأثر بعناصر التحكم . هذا من جهة ومن جهة أخرى سيسهل حساب الاضطرابات التي تطرأ على المفاعل بمساعدة هذه المعادلة .

لا تطبق معادلة الموازنة النيترونية هذه إلا في حالة عدم تغير عدد النيترونات . لم يؤخذ في هذه المعادلة بعين الاعتبار وجود النيترونات الفورية والمتأخرة .

الفصل العاشر

10 ـ تصرف المفاعل في مجال المنبع :

يوضَّع في كل مفاعل منبع مولد لنيترونات يحرر في كل بينة زمنية عدداً ثابتاً من النيترونات . تقدم هذه المنابع في مفاعل تحت الحرج عدداً مستقراً من النيترونات يتعلق بحالة هذا المفاعل . ان مجال الاستطاعة الذي يُحَدد فيه عدد النيترونات من قبل المنبع النيتروني يسمى مجال المنبع .

نناقش تصرف المفاعل في مجال المنبع من خلال الفقرات الآتية :

10 ـ 1 المفاعل المستقر دون الأخذ بعين الاعتبار المنبع :

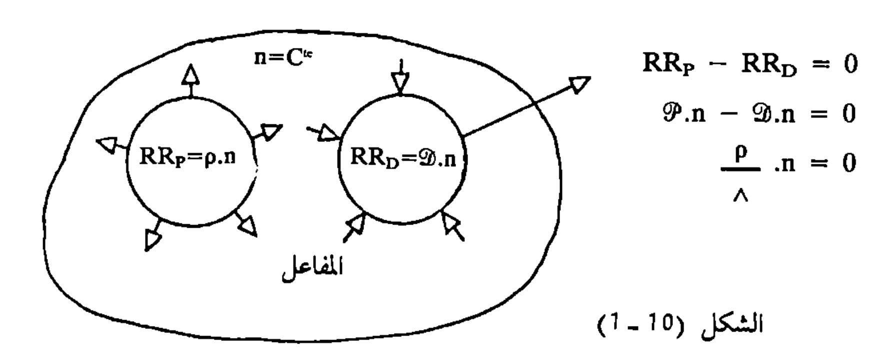
تعالج معادلة الموازنة في مفاعل مستقر في البداية دون الأخذ بعين الاعتبار نيترونات المنبع .

يعتبر المفاعل مستقراً عندما لا يتغير عدد النيترونات مع الزمن أي في حالة المعادلة :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = 0$$

تعني هذه المعادلة أن معدل الربح يساوي معدل الضياع في مفاعل ليس فيه منبع .

يعطى معدل الضياع من خلال معدل الدمار ومعادلة التوازن في مفاعل مستقر دون منبع تكتب كالآتي :



الشكل (10 ـ 1)

نرى من خلال معادلات الموازنة هذه ان مفاعلاً مستقراً خلا من منبع نيتروني هو دوماً حرج $(\rho=0)$. ان عدد النيترونات المستقر هو مع ذلك غير محدد ويمكن ان يأخذ قيماً كيفية وان $n=0$ هي معادلة مستحيلة من الناحية الفيزيائية .

10 ـ 2 المفاعل المستقر ذو المنبع النيتروني :

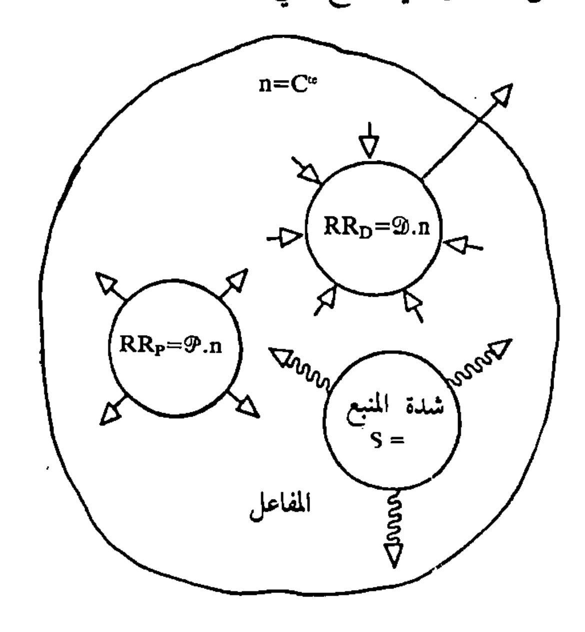
كما تقدم وذكرنا انه لدى أي مفاعل يوجد منبع نيتروني يقدم خلال بينة زمنية عدداً محدداً من النيترونات . وان عدد النيترونات في بينة زمنية المنبعث من المنبع يعطى بوساطة شدة المنبع التي يرمز اليها بـ S . وتمثل شدة المنبع في معادلة الموازنة معدل ربح . وعلى عكس معدل الناتج فان معدل الربح هذا للمنبع لا يعتمد على عدد نيترونات المفاعل .

في حالة عدد صغير من النيترونات يمكن ان تكون S أكبر من معدل الناتج . وفي حالة عدد كبير من النيترونات فان معدل الناتج يكون أكبر بكثير من S وبذلك يمكن اهمال المنبع في معادلة الموازنة وتظل عندئذ الاعتبارات المتعلقة بالمفاعل المستقر سارية المفعول كما كان الحال لدى أي مفاعل يخلو من منبع النيترونات .

ان عدد النيترونات هو مع ذلك قليل في جال المنبع ولذلك فان شدة المنبع تساهم بشكل جيد في معدل الربح . وفي مفاعل مستقر ذي منبع نيتروني يجب لهذا السبب على معدل الناتج ان يكون أصغر من معدل الدمار ، هذا يعني ان يكون

المفاعل تحت الحرج .

ان معادلة الموازنة لمفاعل مستقر ذي منبع هي :



$$RR_P + S - RR_D = 0$$

$$\mathcal{P}.n - \mathcal{D}.n + S = 0$$

$$\frac{\rho}{\wedge}.n + S = 0$$

الشكل (10 ـ 2)

ρ : التفاعلية [−]

∧ : زمن التوالد [s]

n : عدد النيترونات [−]

S : شدة المنبع $[s^{-1}]$

يستنتج من معادلة الموازنة السابقة ان مفاعلاً مستقراً ذا منبع نيتروني يجب ان يكون دوماً تحت الحرج $(\rho<0)$.

10 ـ 3 التكاثر تحت الحرج :

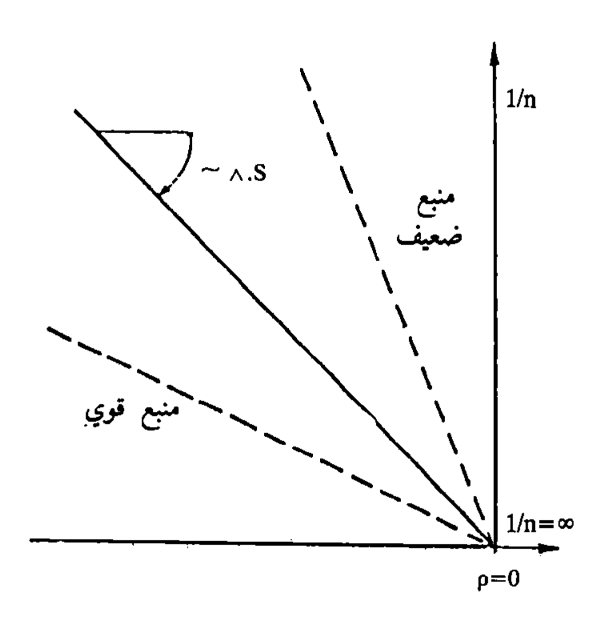
يتواجد كما يلاحظ من خلال معادلة الموازنة في أي مفاعل حرج عدد ثابت من النيترونات يعطى من العلاقة :

$$n = \frac{\wedge.S}{-\rho}$$

ان المفاعل ذا المنبع يكون تحت الحرج بشدة لدى وجود عدد صغير من النيترونات ويكون تحت الحرج قليلاً لدى وجود عدد عال من النيترونات .
وبما ان ∧ و S تكون ثابتة في مفاعل محدد فان جداء عدد النيترونات بالتفاعلية هو أيضاً ثابت . يلاحظ ذلك من المعادلة السابقة .

$$n.\rho = C^{te} \rightarrow \rho_2.n_2 = \rho_1.n_1$$

تتناسب التفاعلية في حالة مفاعل تحت الحرج وذي منبع نيتروني عكساً مع عدد النيترونات . ان العلاقة بين ρ و $\frac{1}{n}$ تشاهد في الشكل (10 ـ 3) .



الشكل (10 ـ 3)

في حالة مفاعل حرج (ρ=0) يتزايد عدد النيترونات ببطء . ذلك يعتمد بشدة على المنبع . في الواقع عندما ρ=0 فان عدد النيترونات n→∞ أي ان المفاعل لا يمكن ان يكون مستقراً .
لذلك فان الحالة الحرجة للمفاعل لا يمكن ان تقاس مخبرياً ولكن لدى تزايد تدريجي في التفاعلية بدءاً من الحالة تحت الحرجة يمكن الوصول الى حالة حرجة

تقريبية . ان ارتفاع عدد النيترونات الناتج من خلال هذه العملية يسمح بطريقة الاستفياء بالوصول الى معرفة مسبقة للحالة الحرجة .

يسمى التحديد الاختباري للحالة الحرجة الاختبار الحرج .

10 ـ 4 الاختبار الحرج :

يسمح التكاثر تحت الحرج بتحديد مسبق لحالة المفاعل الحرجة . يجري تزايد التفاعلية في مفاعل تحت الحرج من خلال أربع طرائق هي :

أولاً : زيادة الأخصاب في مواد الوقود أو زيادة كثافة مادة الوقود ، بذلك ترتفع نسبة الناتج النيتروني الى الامتصاص النيتروني أي يتزايد المقدار $\frac{\mathcal{P}}{\mathcal{A}}$

وبذلك تتزايد قيمة التفاعلية ρ .

ثانياً : زيادة تعبئة عناصر الوقود ، ذلك ينقص قيمة الفقد أي ينقص قيمة $\mathcal{L}$ ويزيد قيمة ρ .

ثالثاً : سحب قضبان التحكم : ذلك يؤدي الى انقاص الامتصاص ($\mathcal{L}$ تتزايد وأيضاً ρ) .

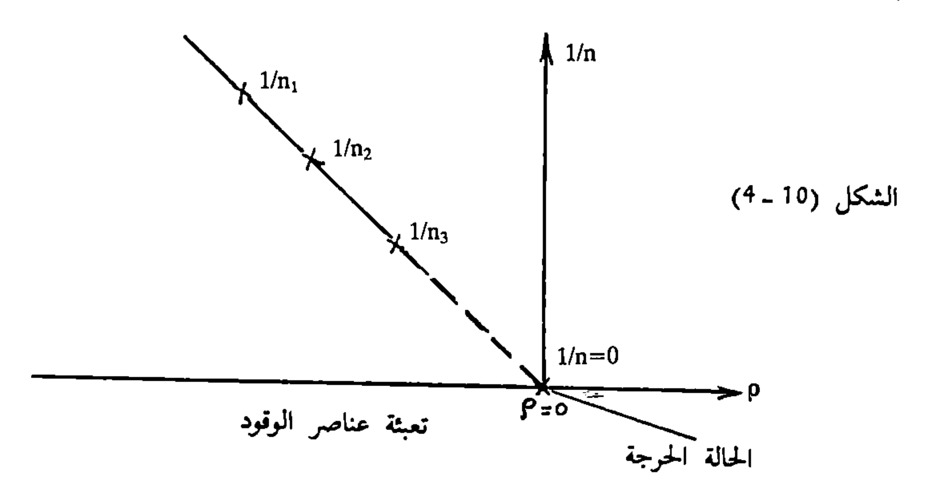
رابعاً : انقاص تركيز حمض البور في المهدىء . ذلك ينقص قيمة الامتصاص . بينما يستفاد من الامكانية الأولى في التصميم النظري للمفاعل ، يستفاد من الامكانيات الثلاث المتبقية لتحديد الحالة الحرجة تجريبياً .

كيفية اجراء الاختبار الحرج :

يقاس عدد النيترونات n_1 في حالة المفاعل تحت الحرجة ثم يعين في المخطط مقلوب n_1 أي $\frac{1}{n_1}$. ثم يتم تزايد التفاعلية تدريجياً لدى التعبئة التدريجية للمفاعل أو لدى اقلاع المفاعل بسحب قضبان التحكم أو بانقاص تركيز حمض البور .

يتزايد تدريجياً عدد النيترونات . يقاس هذا العدد عند كل خطوة ثم تحدد النقاط $\frac{1}{n_1}$ و $\frac{1}{n_2}$ ثم $\frac{1}{n_3}$ ... الخ . على الورق بدلالة القيم

$\frac{1}{n}$) على المحور الشاقولي و ρ على المحور الأفقي) كما هو مبين في الشكل (10 - 4) .



الشكل (10 - 4)

ثم نرسم مستقيماً يمر من النقاط $\frac{1}{n_1}$ و $\frac{1}{n_2}$ و $\frac{1}{n_3}$ ... حتى $0 = \frac{1}{n}$ (نقطة مبدأ الاحداثيات) . نحصل بذلك على مستقيم . هذه العملية تسمح بالتنبؤ المسبق عن عدد عناصر الوقود أو عن تركيز حمض البور للوصول الى الحالة الحرجة .

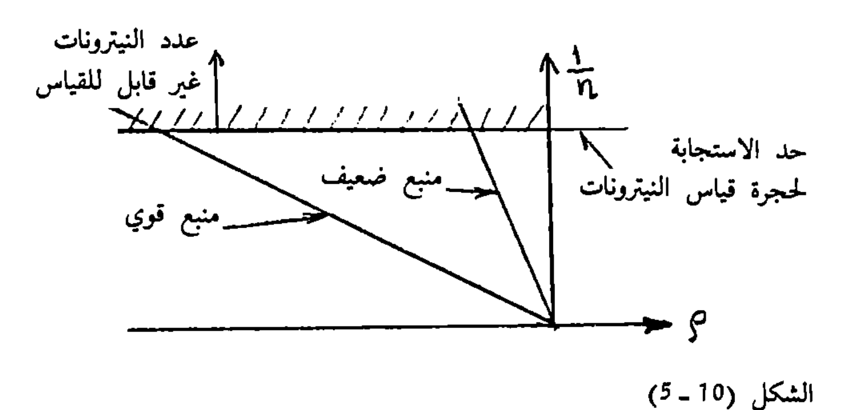
يساعدنا هذا الاختبار في تحديد التعبئة الحرجة للمفاعل لأنه كما سبق وقلنا لا يمكن نظرياً حساب الكتلة أو الحالة الحرجة ولذلك يجب اجراء الاختبار الحرج قبل الشروع بتعبئة المفاعل بعناصر .

10 ـ 5 معنى المنبع النيتروني :

ان المنبع النيتروني ، استثناء لدى الاختبار الحرج هو ضروري جداً لأقلاع المفاعل . يكون المفاعل في حالة التوقف عن العمل تحت الحرج . وإذا لم يشيَّد فيه منبع نيتروني فان عدد النيترونات هو قليل جداً بحيث يتعذر قياسه بوساطة حجرة قياس النيترونات .

ان اقلاع المفاعل في هذه الحالة هو خطير جداً اذ تصعب مراقبة ارتفاع عدد النيترونات . ولكي يتواجد في مفاعل متوقف عن العمل عدد من النيترونات قابل للقياس ، نضع فيه لهذا السبب منبعاً نيترونياً . ولذات السبب لا يسمح لشدة المنبع ان تكون أقل من قيمة محددة لأنه في هذه الحالة أيضاً يتعذر قياس عدد النيترونات .

انظر الشكل (10 ـ 5) .



الشكل (10 ـ 5)

عن أهمية المنبع النيتروني يجب ملاحظة ما يلي :

ليس المنبع النيتروني مصدراً للنيترونات فحسب وإنما هو مكون من مادة ماصة يساهم في معدل الامتصاص . بينما تكون شدة المنبع ثابتة . فان معدل الامتصاص للمنبع يتناسب مع عدد نيترونات المفاعل . في حالة وجود عدد صغير من النيترونات فان شدة المنبع S هي أكبر بكثير من معدل الامتصاص للمنبع . ولذلك ينقص عدد النيترونات عندما يتم ابعاد المنبع النيتروني عن المفاعل المستقر في حال وجود عدد قليل من النيترونات . وعلى عكس ذلك فاذا أبعد المنبع النيتروني عند وجود عدد عال من النيترونات ، يتزايد هذا العدد لأنه في حال عدد عال من النيترونات فان معدل الامتصاص للمنبع يمكن ان يكون أكبر من شدة المنبع .

10 ـ 6 اقلاع المفاعل :

ان التكاثر تحت الحرج هو ساري المفعول لدى الاختبار الحرج وأيضاً في حالة اقلاع المفاعل بوساطة سحب قضبان التحكم تدريجياً ، أي خطوة فخطوة .

عند الاقلاع لدينا التصرف التالي :

في الحالة تحت الحرجة والمستقرة لدينا المعادلة :

$$\rho . n = C^{te}$$

$$\rho_2 . n_2 = \rho_1 . n_1$$

يرتفع في الحالة الحرجة الدقيقة (الحالة b) عدد النيترونات خطياً لأن المنبع النيتروني يقدم في بينة زمنية عدداً ثابتاً من النيترونات دون الأخذ بعين الاعتبار النيترونات المتأخرة لدينا :

$$\rho = 0 : \quad \frac{\Delta n}{\Delta t} = S \rightarrow n(t) = n_0 + S.t$$

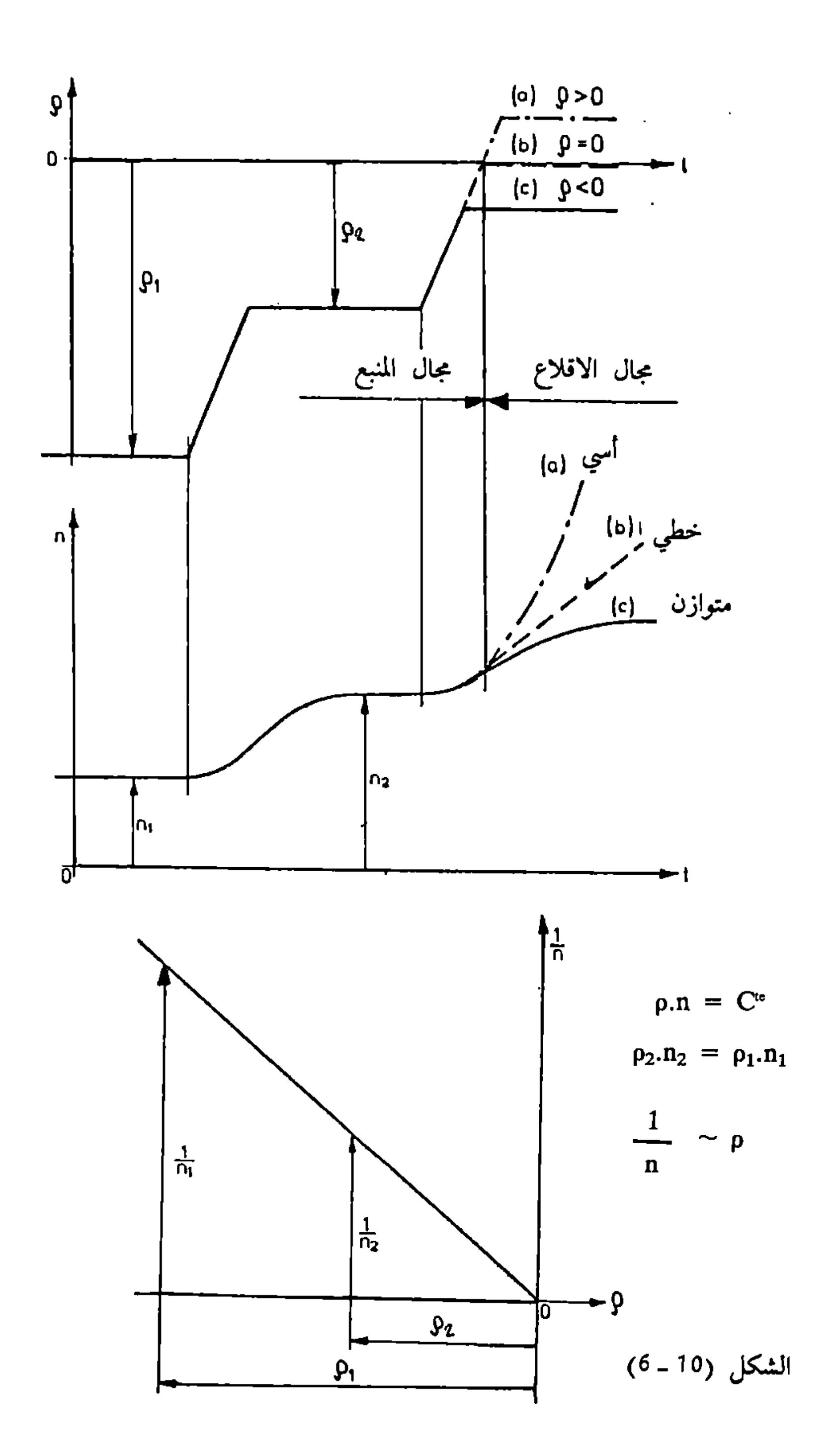
في الحالة فوق الحرجة ($\rho > 0$) لا يسري مفعول العلاقات العائدة لمجال المنبع

لأن المفاعل هو الآن في حالة الاقلاع التدريجي .

وفي الحالة فوق الحرجة الثابتة للمفاعل (الحالة a) يتزايد عدد النيترونات

أُسياً .

انظر الشكل (10 ـ 6) .



(a) ρ >0
(b) ρ =0
(c) ρ<0
ρ2
ρ1
مجال المنبع
مجال الاقلاع
أسي (a)
خطي (b)
متوازن (c)
n2
n1
ρ.n = C^te
ρ2.n2 = ρ1.n1
1/n ~ ρ
1/n1
1/n2
ρ2
ρ1

الشكل (10 ـ 6)

الفصل الحادي عشر

11 ـ معادلة الموازنة النيترونية لدى اعتبار النيترونات المتأخرة :

نورد في هذه الفقرة ، لمناقشة تصرف المفاعل الزمني ، معادلة الموازنة الهامة . نأخذ بعين الاعتبار في هذه المعادلة النيترونات المتأخرة لأنها تؤثر بقوة على التصرف الزمني .

11 ـ 1 مصدر النيترونات المتأخرة :

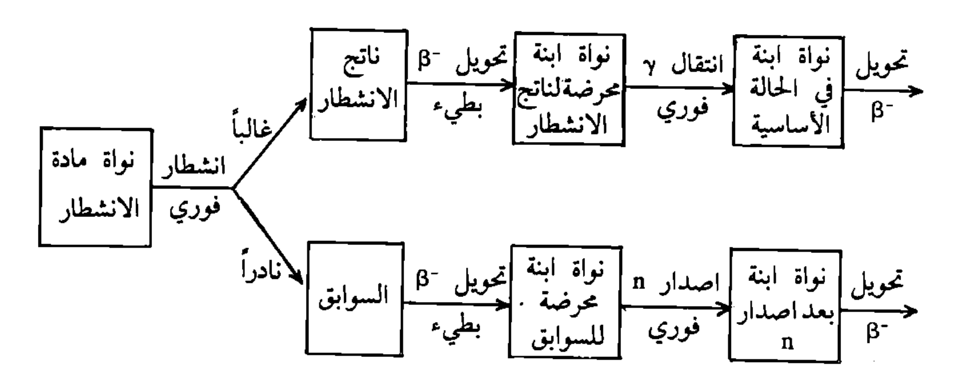
تنشأ لدى الانشطار النووي خلال زمن قصير جداً (10^{-12}s) نيترونات فورية ، أي اشعاع γ فوري ونتاجات انشطار .

ان نتاجات الانشطار هذه تُظهر فائضاً نيترونياً عالياً وتقدم بذلك تحول β^- ذا عمر النصف الذي يقدر ببضع ثوان أو بعدد كبير من الأيام . ان النوى البنات الناتجة عن الانشطار تكون محرضة فتعطي بذلك طاقتها التحريضية من خلال اصدار اشعاع γ خلال زمن قدره 10^{-12}s .

يقدم الانشطار النووي في حالات نادرة نتاجات أنشطار خاصة تسمى السوابق يبلغ عددها لكل ألف انشطار عشر سوابق تقريباً . تسبب هذه السوابق اصدار اشعاع β^- أيضاً .

ان النوى البنات الناتجة هي محرضة بشدة بحيث يصبح اصدار نيترون واحد ممكناً . وبما ان هذه النيترونات تَظْهرُ بعد تحويل السوابق الى اشعاع β^- متأخرةً عن الانشطار فانها تسمى نيترونات متأخرة ويرمز اليها بـ n_V .

تشاهد في الشكل (11 ـ 1) تحولات نواة مادة الانشطار .



الشكل (11 ـ 1)

مثال :

$$^{235}U \xrightarrow[\text{فوري}]{(n,f)} {}^{87}Br \xrightarrow[55,7s]{\beta^-} [{}^{87}Kr]^* \xrightarrow[\text{فوري}]{n_V} {}^{86}Kr \xrightarrow[\text{استقرار}]{}$$

تظهر لدى الانشطار مواد أنشطار أخرى كاليورانيوم (233 و235) والبلوتونيوم 239 . لكل من هذه المواد توجد ست زمر من السوابق أعمار النصف لها تتراوح بين 0,2 ثانية و60 ثانية .

(مثلاً $t_{1/2} = 55.7s$ و ^{87}Br) انظر الشكل (11 ـ 1) .

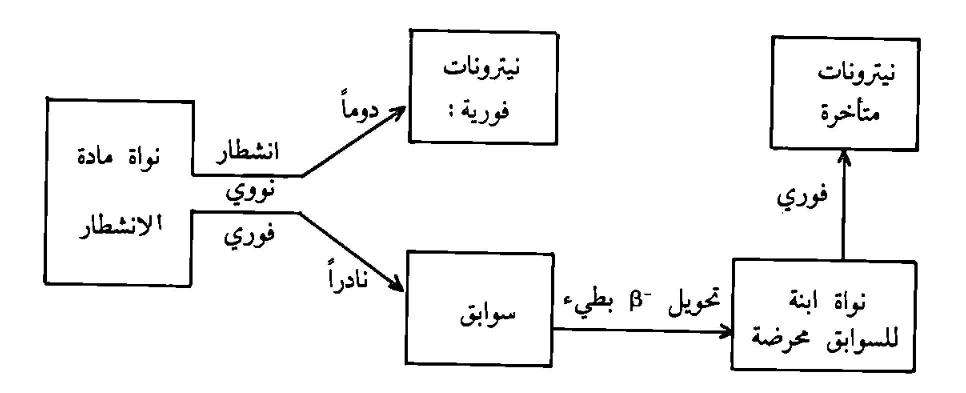
يلعب نوع آخر من النيترونات دوراً في المفاعلات المهدأة بالماء الثقيل أو بالباريليوم ، في الواقع ان هناك فتونات عالية الطاقة تستطيع تحريض النويات H-2 وBe-9 لدرجة عالية بحيث يصدر من خلال التفاعل (H-2) فوتونيترون .

وإذا أتت هذه الفوتونات من خلال تحويل β^- العائد الى نتاجات الانشطار فان الفوتونترونات تظهر متأخرة بدلالة الزمن .

ان انتاج الفوتونترونات المتأخرة زمنياً بالمقارنة مع انتاج النيترونات الناجمة عن السوابق هو ضئيل جداً .

11 ـ 2 انتاج النيترونات الفورية والمتأخرة :

ان الجزء الأكبر من النيترونات في المفاعل ينشأ مباشرة لدى الانشطار اما الجزء الباقي فينبعث من السوابق متأخرة زمنياً عن الانشطار.



من بين النيترونات الناتجة عن الانشطار هناك جزء صغير β يصدر عن السوابق .

يشاهد في الجدول الآتي الجزء المتأخر β من النيترونات وذلك لمواد الانشطار U-235, Pu-239 و U-233 .

الجزء β من النيترونات المتأخرة	مادة الانشطار
0,27%	U-233
0,65%	U-235
0,21	Pu-239

11 ـ 3 انتاج النيترونات الفورية والسوابق :

تنشأ النيترونات الفورية والسوابق مباشرة من الانشطار النووي . وان انتاج النيترونات الفورية الحرارية في بيئة زمنية يعطى من قبل الانتاج الفوري الذي يرمز اليه بـ $RR_{P,Pr}$.

حيث :

$$RR_{P,Pr} = (1-\beta).\mathcal{P}.n$$

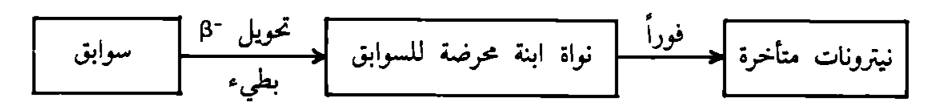
اما انتاج السوابق في بيئة زمنية فيعطى من قبل معدل انتاج السوابق RR_C .

حيث :

$$RR_C = \beta.\mathcal{P}.n$$

11 ـ 4 تفكك السوابق :

يحدث تفكك السوابق تحولات β^- وبذلك تنبعث نيترونات متأخرة .



رأينا سابقاً انه لدى انشطار U-235, U-233 و Pu-239 أن لكل من مواد الانشطار هذه ست زمر من السوابق تتراوح أعمار النصف لها بين 0,2 و 60 ثانية .

ولتبسيط الأمور نفرض سابقة واحدة وسطية يشاهد عمر النصف لها في الجدول التالي :

مادة الانشطار	عمر النصف للسابقة الوسطية
U-233	12,8 s
U-235	9,0 s
Pu-239	10,7 s

ان السوابق تتفكك طبقاً لقانون التفكك الاشعاعي ويتناسب نشاطها مع عددها اللحظي الذي يرمز اليه بـ C .
ان نشاط السوابق AK_C يعطي الضائع من السوابق في بينة زمنية .

$$AK_C = \lambda . C$$

λ : ثابتة التفكك .
C : عدد السوابق .
بما انه لدى أي تحويل لسابقة يجري اصدار نيترون متأخر فان نشاط السابقة يساوي معدل انتاج النيترونات المتأخرة .
نستطيع ان نكتب معادلة السابقة التالية :

نشاط السابقة = معدل الانتاج المتأخر

ان معدل انتاج النيترونات الحرارية الذي يرمز اليه بـ $PR_{P,V}$ ، يُعطى اذن من العلاقة :

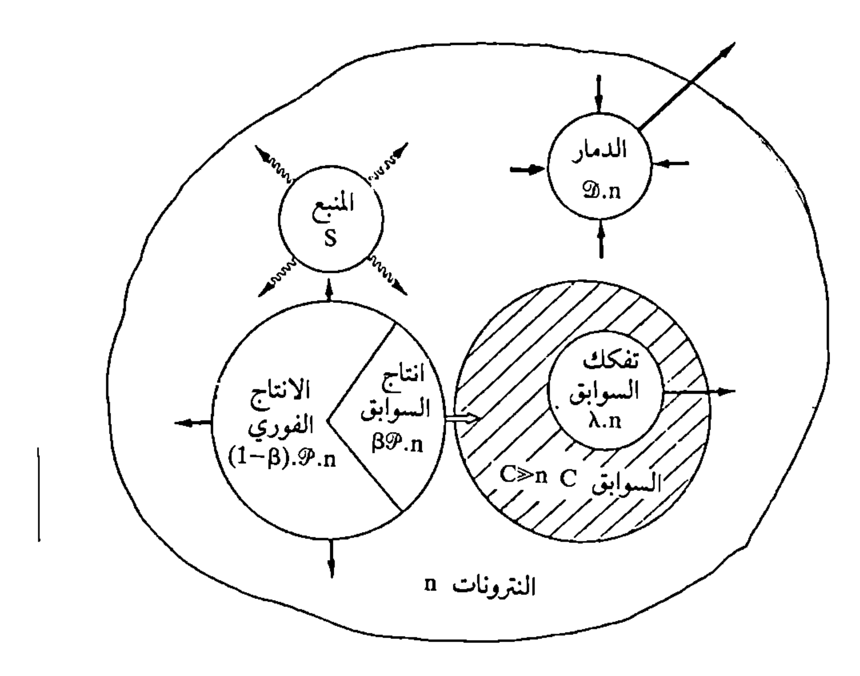
$$RR_{P,V} = \lambda . C$$

بمساعدة معدل التفاعل هذا نستطيع ان نشكل معادلة الموازنة للنيترونات والسوابق .

11 ـ 5 معادلة الموازنة مع الأخذ بعين الاعتبار النيترونات المتأخرة والمنبع :
معادلة الموازنة النيترونية باعتبار النيترونات المتأخرة والمنبع : انظر الشكل (2 ـ 11) .

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = (1-\beta).\mathcal{P}.n + \lambda.C + S - \mathcal{D}.n$$

تغير عدد النيترونات في بينة زمنية . = معدل الانتاج الفوري + معدل الانتاج المتأخر + شدة المنبع − معدل الدمار



الشكل (11 ـ 2)

معادلة الموازنة للسوابق :

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = \beta.\mathscr{P}.n - \lambda.C \rightarrow$$ متأخر β^- تحويل

معدل انتاج السوابق — نشاط السوابق

11 ـ 6 مناقشة معادلة الموازنة :

في مجال الأقلاع التدريجي يكون عدد النيترونات كبيراً بحيث ان معدل الانتاج من النيترونات هو أكبر بكثير من شدة المنبع . لذا يمكن اهمال شدة المنبع في معادلة الموازنة . بذلك يعتبر المفاعل في مجال الاقلاع التدريجي مستقراً .

معادلة التحريك الأساسية :

إذا بدلت في معادلة الموازنة احتمالات التفاعل $\mathscr{P}$ و $\mathscr{D}$ بالقيم المتغيرة التحريكية ρ و Λ نحصل على المعادلة التحريكية التالية :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{\rho-\beta}{\Lambda}.n + \lambda.C$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{\beta}{\Lambda}.n - \lambda.C$$

تسمح هذه المعادلات بدراسة التصرف الزمني لعدد النيترونات في المفاعل النووي .

11 ـ 7 التصرف الزمني دون اعتبار النيترونات المتأخرة :

لمناقشة التصرف الزمني يجب أولاً افتراض مفاعل صوري لا تُصدر السوابق فيه نيتروناتٍ متأخرة . فالمعادلة التحريكية تصبح :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{\rho-\beta}{\Lambda}.n \; ; \; C = 0$$

وبما ان زمن التوالد صغير جداً ($\Lambda=10^{-4}s$) فان عدد النيترونات في مثل هذا المفاعل سيتغير بسرعة . نميز ثلاث حالات :

$\rho>\beta$: يتغير عدد النيترونات بسرعة .

$\rho=\beta$: عدد النيترونات يظل ثابتاً وتسمى هذه الحالة حرجة فورية .

$\rho<\beta$: يتناقص عدد النيترونات بسرعة .

نرى من ذلك ان الجزء المتأخر من النيترونات (β) يلعب دوراً هاماً في التصرف الزمني للمفاعل ولهذا السبب فان هناك تعريفين للتفاعلية :

ـ التفاعلية الفورية ρ_p :

$$\rho_p = \rho - \beta$$

في الحالة الحرجة الفورية : $\rho_n=0$

ـ التفاعلية المعيارية ρ_n : حيث :

$$\rho_n = \frac{\rho}{\beta}$$

في الحالة الحرجة الفورية : $\rho_n=1$.

ان واحدة التفاعلية المعيارية هي الدولار ويرمز اليها بـ $.
في الحالة الحرجة الفورية فان ($\rho_n=1$ $) .

	الحالة الحرجة ρ , ρ_n	الحالة الحرجة الفورية : $\rho=\beta$ ρ_n	ρ
U-235, β=0,0065	0	1	0,0065
U-239, β=0,0021	0	1	0,0021

11 ـ 8 تأثير النيترونات المتأخرة :

تمنع النيترونات المتأخرة في مفاعل تحت الحرج أو فوق الحرج تغيُّراً سريعاً في عدد النيترونات .

عدد السوابق في مفاعل مستقر وحرج :

في مفاعل مستقر حرج فان الربح من السوابق يساوي الضياع من هذه السوابق أي $\frac{\Delta C}{\Delta t}=0$ ومنه :

$$\frac{\beta}{\wedge}.n = \lambda.C$$

يحتوي المفاعل المستقر الحرج على عدد ثابت من السوابق هو :

$$C = \frac{\beta}{\wedge.\lambda}.n = \frac{\beta.t_{1/2}}{\wedge.0,7}.n \approx 1000.n$$

يحتوي المفاعل المستقر إذن على مخزون هائل من السوابق . فعدد السوابق يساوي تقريباً ألف مرة عدد النيترونات . يتفكك هذا المخزون من السوابق ببطء خلال عمر النصف الذي يساوي تقريباً 10 s .

الحالة فوق الحرجة الفورية $(\rho>\beta)$:

رأينا سابقاً ان عدد النيترونات يتزايد بسرعة كبيرة دون اعتبار النيترونات المتأخرة . وفي مفاعل حقيقي يتزايد عدد النيترونات أيضاً بسرعة أكبر بسبب تفكك السوابق .

وبما ان النيترونات المتأخرة ستنبعث من هذه السوابق التي كانت موجودة قبل 10 s بسبب الانشطار وان تزايد النيترونات في ثانية واحدة هو كبير جداً ، فان هذه النيترونات المتأخرة لا تلعب دوراً . وبسبب التزايد السريع لعدد النيترونات فان الحالة فوق الحرجة الفورية هي خطرة جداً يجب تجنب حدوثها لأسباب أمنية .

الحالة الحرجة الفورية $(\rho=\beta)$:

يجري في مفاعل حرج فوري تغيُّر عدد النيترونات من خلال تفكك السوابق فحسب . وكما رأينا سابقاً فان معدل تفكك السوابق وبذلك انتاج النيترونات المتأخرة في مفاعل حرج بالذات هو كبير جداً .

في الواقع فان $\frac{\beta}{\wedge} = 100 s^{-1}$ ؛ أي ان تزايد عدد النيترونات يكون مئة مرة أكبر من عدد النيترونات السابقة .

ولهذا السبب يتزايد عدد النيترونات في مفاعل حرج بسرعة كبيرة .

الحالة تحت الحَرجة الفورية $(\rho<\beta)$:

كما رأينا سابقاً : في مفاعل لا تصدر فيه نيترونات متأخرة ينخفض فيه عدد النيترونات بسرعة كبيرة وان الربح من النيترونات المتأخرة الناتج عن تفكك السوابق يمنع عملية الانخفاض السريعة هذه . وبما ان النيترونات المتأخرة ستصدر عن هذه السوابق التي كانت موجودة منذ عشر ثوان بسبب الانشطار فان التغير الزمني لعدد النيترونات يجري ببطء .

في مفاعل فوق الحرج ($\rho>0$) يكون الربح $\lambda.C$ من النيترونات خلال بينة زمنية أكبر من الخسارة في النيترونات في بينة زمنية والتي تساوي $\frac{\rho-\beta}{\wedge}.n$

وبما ان $\rho<\beta$ فان $\frac{\rho-\beta}{\wedge}.n$ هي قيمة سالبة ولذلك فان عدد النيترونات يتزايد ببطء .

في مفاعل تحت الحرج ($\rho<0$) يكون الربح $\lambda.C$ من النيترونات في بينة زمنية أصغر من الخسارة $\frac{\rho-\beta}{\wedge}.n$ ، ولذلك فان عددالنيترونات يتناقص ببطء .

الفصل الثاني عشر

12 ـ التزايد النيتروني في مجال الاقلاع :

يكون المفاعل في مجال الاقلاع عندما يرتفع عدد النيترونات فوق مجال المنبع . المفاعل هو الآن فوق الحرج ($\rho>0$) . وعدد النيترونات هو كبير بحيث يمكن اهمال المنبع النيتروني .

يحدد المجال الأعلى للاقلاع من قبل عدد النيترونات الذي بموجبه يبدأ المفاعل ان يسخن تدريجياً .

ان بنية المفاعل لا تتعلق بعدد النيترونات في مجال الاقلاع وانما يجرى التأثير عليها من الخارج بوساطة عناصر التحكم .

12 ـ 1 عدد النيترونات واستطاعة المفاعل :

ان الاعتبارات التالية هي سارية المفعول بدقة لدى التصرف الزمني لعدد النيترونات . لسنا معنيين غالباً في التصرف الزمني لعدد النيترونات لدى مفاعلات المحطات النووية بقدر ما نحن معنيون باستطاعة المفاعل . لذا فاننا نتطرق باختصار الى العلاقة بين عدد النيترونات واستطاعة المفاعل .

أولاً : يتناسب عدد النيترونات في مفاعل مستقر مع استطاعة هذا المفاعل .

ثانياً : يجب الأخذ بعين الاعتبار ان ٪92 من الطاقة المحررة يُنتج مباشرة بعد الانشطار وان المتبقي من الطاقة أي ٪8 يأتي من خلال تحويل β متأخراً عن

الانشطار . تتكون اذن الاستطاعة الحرارية من جزئين : الجزء الفوري والجزء المتأخر .

فالجزء الفوري وهو ٪92 من مجمل الاستطاعة يتناسب بالطبع مع معدل الانشطار وبالتالي مع عدد النيترونات .

واما الجزء المتأخر فيعتمد على كمية مواد الانشطار في المفاعل التي تُحدد من قبل كيفية الاستهلاك .

12 ـ 2 زمن التضاعف :

في مفاعل فوق الحرج (ثابت) يتزايد عدد النيترونات أسياً أي ان عدد النيترونات يتغير خلال فترات زمنية متساوية بذات المعامل . فاذا تزايد عدد النيترونات مثلاً خلال دقيقة واحدة من 10^{10} الى 10^{11} فان عدد النيترونات يبلغ بعد دقيقتين 10^{12} وبعد ثلاث دقائق 10^{13} . ان هذا التزايد يمكن التعبير عنه بوساطة مفهوم زمن التضاعف t_2 .

ان زمن التضاعف t_2 هو الفترة الزمنية التي يتضاعف خلالها عدد النيترونات n .

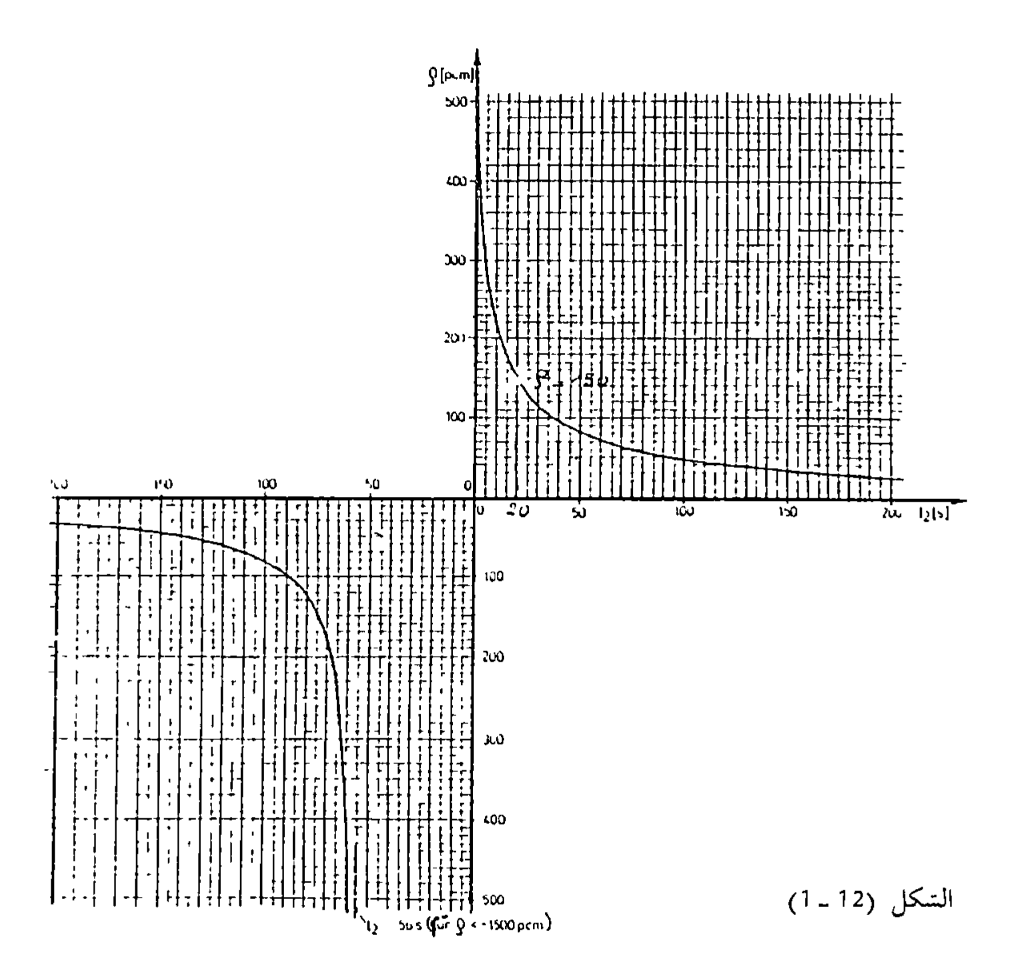
في مفاعل تحت الحرج يتناقص عدد النيترونات أسياً وهذا التناقص يعبر عنه أيضاً بوساطة زمن التضاعف ويرمز اليه بإشارة ناقص. إذن فان زمن التضاعف السالب هي الفترة الزمنية التي ينخفض خلالها عدد النيترونات الى النصف . يستعمل بدلاً عن t_2 زمن التضاعف ، الفترة الزمنية التي تسمى دور المفاعل والتي خلالها يتغير عدد النيترونات من القيمة e ‏(e=2,72) . ويعبر عن تزايد العدد النيتروني أيضاً بعدد الديكاد النووي الذي يتزايد فيه خلال دقيقة واحدة . في الواقع لدينا :

$$n = n_0 \, e^{t/T}$$

في حالة t=T حيث T هو دور المفاعل فان $n=n_0.e$.

12 ـ 3 تحديد زمن التضاعف :

ان زمن التضاعف يعتمد بالطبع على تفاعلية المفاعل . تشاهد العلاقة بين التفاعلية وزمن التضاعف بوساطة المنحنيات الواردة في الشكل (12 ـ 1) والتي تسمى منحنيات معكوس الساعة (Inhourcurve) وذلك من أجل U-235 .



التشكل (12 ـ 1)

مثال من أجل $\rho > 0$

ما هي قيمة رمس التضاعف في مفاعل تبلغ فيه التفاعلية 150 pcm؟

$$\rho = 150\ \text{pcm} \rightarrow t_2 = 20\ \text{s}$$

مثال آخر .

من أجل أية تفاعلية يتزايد عدد النيترونات خلال رمن تضاعف يساوي أربعين ثانية

$$t_2 = 40\ \text{s} \rightarrow \rho = 96\ \text{pcm}$$

مثال آخر $\rho<0$:

كم يبلغ زمن التضاعف في مفاعل فيه $\rho=150$ pcm وفي الحالة تحت الحرجة .

$$\rho = 150 \text{ pcm} \rightarrow t_2 = -74 \text{ s}$$

مثال :

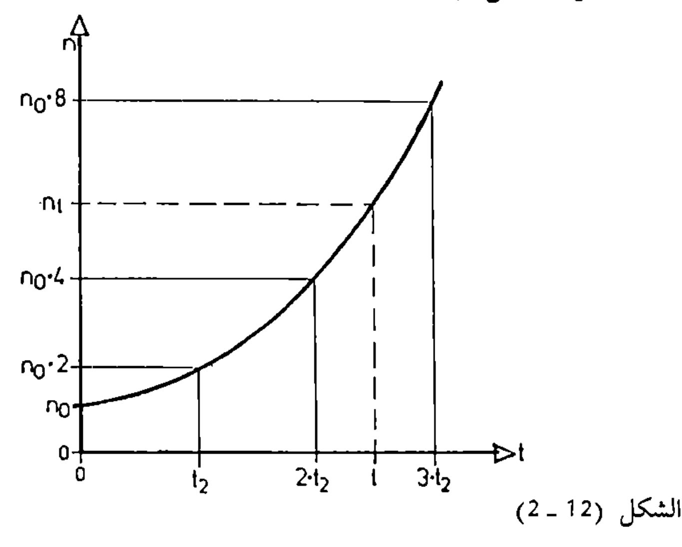
ما هي قيمة التفاعلية التي بموجبها ينخفض عدد النيترونات خلال زمن تضاعف يساوي -100 s

$$t_2 = -100 \text{ s} \rightarrow \rho = -83 \text{ pcm}$$

12 ـ 4 عامل التزايد :

في مفاعل ثابت فوق الحرج يتزايد عدد النيترونات خلال زمن التضاعف من ضعف قيمته . وبعد زمني تضاعف فان عدد النيترونات يبلغ أربعة أمثاله وبعد ثلاثة أزمنة تضاعف يبلغ ثمانية أمثاله .

انظر الشكل (12 ـ 2) .



الشكل (12 ـ 2)

إذا كان زمن التزايد t مساوياً لعدد صحيح مضروب بزمن التضاعف فانه يصبح بالامكان تحديد عدد النيترونات n_t عن ظهر قلب .

مثال :

في مفاعل فوق الحرج تفاعليته = 115 pcm تم قياس تزايد عدد النيترونات فوجد انه مساوٍ لـ 10^{10} . كم سيكون عدد النيترونات بعد مضي دقيقتين ؟ .

$\rho = 115 \text{ pcm} \rightarrow t_2 = 30 \text{ s}$

$2 \text{ min} = 4 \; t_2$

$n_t = n_0 .16 = 16.10^{10} = 1,6.10^{11}$

إذن عدد النيترونات بعد دقيقتين هو $1,6.10^{11}$.

مثال :

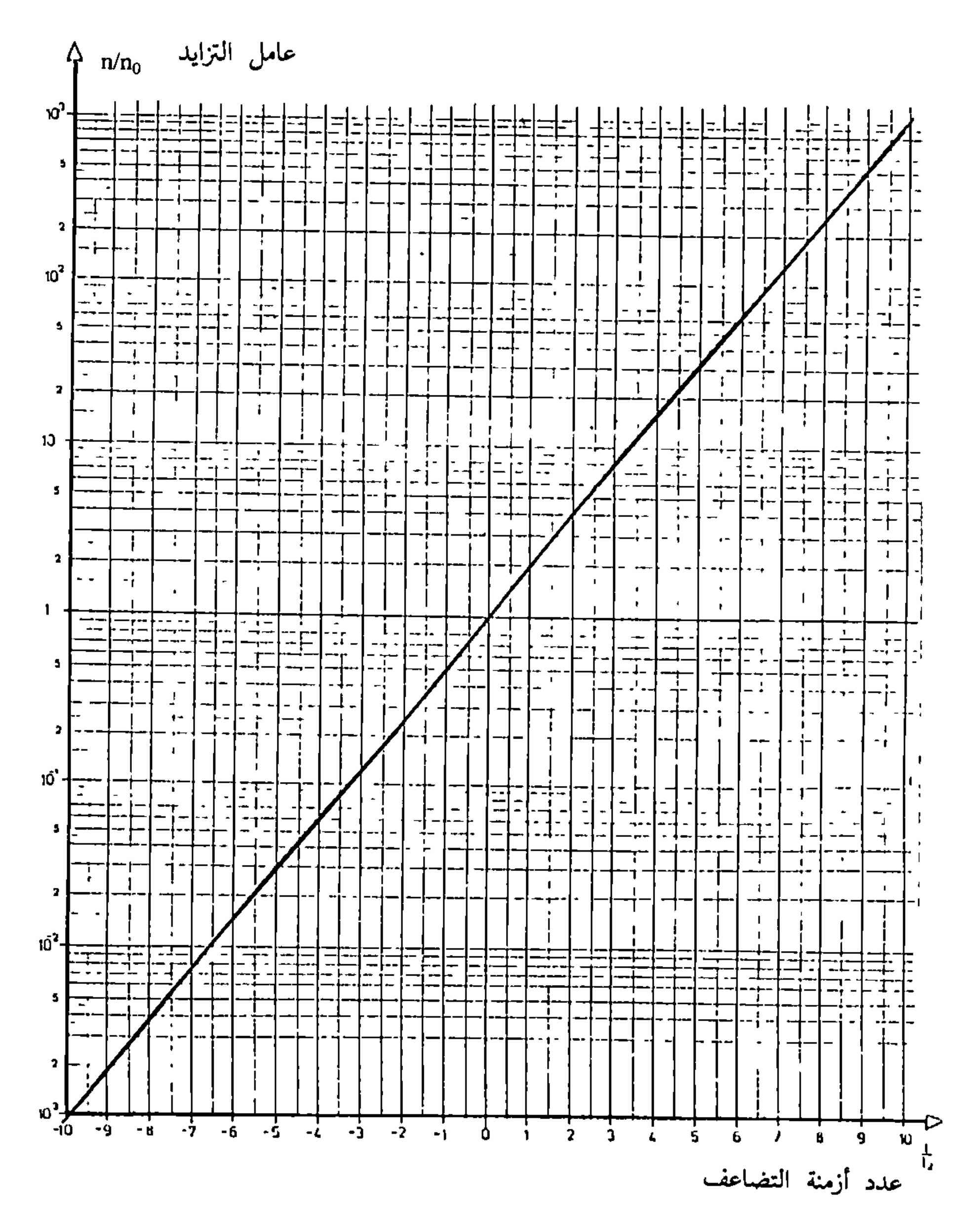
قيس لدى اقلاع المفاعل عدد النيترونات فبلغ 10^{13} وبعد خمس دقائق قيس عدد النيترونات فبلغ 8.10^{13} . كم تبلغ التفاعلية ؟.

$$n_0 .8 \rightarrow 3 \; t_2, \; t_3 = \frac{300 \text{ s}}{3} = 100 \text{ s}$$

اذن : $\rho = 46$ pcm

عدد النيترونات n_t	عدد أزمنة التضاعف	الزمن t
n_0	0	0
$n_0 .2$	1	t_2
$n_0 .4$	2	$2.t_2$
$n_0 .8$	3	$3.t_3$
...	...	...
n_0 . عامل التزايد	t/t_2	t

الشكل (12 ـ 3)


عامل التزايد n/n_0
عدد أزمنة التضاعف
-10
-9
-8
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

الشكل (12 ـ 4)

يجب استعمال منحني معكوس الساعة لحساب التفاعلية . وإذا لم يكن زمن التزايد أو زمن التناقص مساوياً لعدد صحيح مضروب بزمن التضاعف فانه يجب والحالة هذه تحديد عدد النيترونات n_t بوساطة عامل التزايد المعرف بالعلاقة التالية :

$$n_t = n_0 \,.\, \text{عامل التزايد}$$

يعتمد عامل التزايد على عدد أزمنة التضاعف ويمكن ان يقرأ على المنحني الوارد في الشكل (12 ـ 4) حيث نجد على المحور الشاقولي عامل التزايد $\frac{n}{n_0}$ وعلى المحور الأفقي عدد أزمنة التضاعف $\frac{t}{t_2}$.

12 ـ 5 تطبيق في عامل التزايد :

1 ـ في مفاعل فيه التفاعلية تساوي 80 pcm تم قياس عدد النيترونات فبلغ 10^{11} . كم سيبلغ عدد النيترونات بعد مضي ثمان دقائق ؟ .

(منحني معكوس الساعة) $\rho = 800\ pcm \rightarrow t_2 = 52\ s$

$$\frac{t}{t_2} = \frac{480\ s}{52\ s} \rightarrow 6.10^2 = \text{عامل التزايد}$$

$$n_t = n_0 \,.\, \text{عامل التزايد} = 10^{11}.6.10^2 = 6.10^{13}$$

2 ـ ابان اقلاع المفاعل قيس عدد النيترونات فبلغ 10^9 وبعد مضي عشر دقائق قيس عدد النيترونات فبلغ 5.10^{10} . كم ستكون قيمة التفاعلية ؟ .

$$\frac{n_t}{n_0} = \frac{5.10^{10}}{10^9} = 50 \rightarrow \frac{t}{t_2} = 5,6$$

$$t_2 = \frac{t}{5,6} = \frac{600}{5,6} = 107\ s \rightarrow \rho = 44\ pcm$$

يكون اذن المفاعل فوق الحرج عند تفاعلية $\rho = 44\ pcm$.

3 ـ في مفاعل تحت الحرج التفاعلية هي 90 pcm . قيس عدد النيترونات فبلغ 10^{11} . كم هو عدد النيترونات بعد مضي 15 دقيقة ؟ .

(منحني معكوس الساعة) $\rho=-90\ pcm \rightarrow t_2=-95\ s$

عامل التزايد = $\frac{t}{t_2}=\frac{900}{-95}=-9{,}47 \rightarrow 1{,}3.10^{-3}$

$n_t=n_0$. عامل التزايد = $10^{11}.1{,}3.10^{-3} = 1{,}3.10^{8}$

اذن يبلغ عدد النيترونات بعد مضي 15 دقيقة $1{,}3.10^{8}$.

الفصل الثالث عشر

13 ـ دور المفاعل :

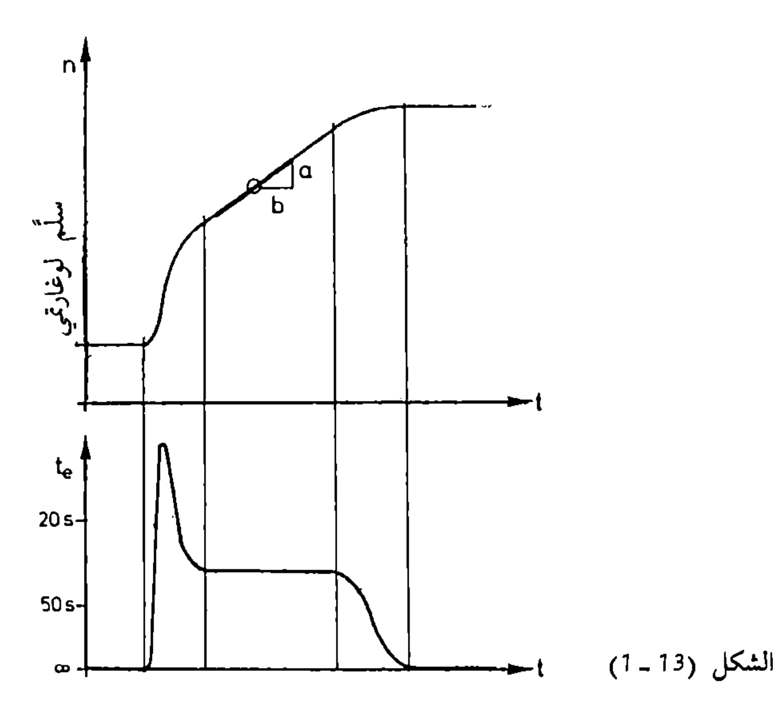
يفضل تحديد تزايد كيفي في النيترونات بوساطة ما يسمى دور المفاعل t_e .
توجد بين لوغارتم عدد النيترونات ودور المفاعل علاقة فيزيائية مباشرة كما سنرى فيما بعد وان دور المفاعل هو مقدار مميز لتزايد عدد النيترونات نتكلم عنه فيما يلي :

13 ـ 1 دور المفاعل الآني :

يعبر عن دور المفاعل الآني من خلال التزايد الآني لعدد النيترونات الذي هو كما قلنا سابقاً قيمة هامة تحدَّد من قبل لوغارتم عدد النيترونات وتقاس في كل مفاعل بوساطة الجهاز الراسم . فبين دور المفاعل الآني وتزايد لوغارتم عدد النيترونات توجد العلاقة الفيزيائية التالية :

ان معكوس دور المفاعل الآني $\frac{1}{t_e}$ يتناسب طرداً مع تزايد لوغارتم عدد النيترونات أي : $\frac{1}{t_e} \sim$ مع الميل $\frac{a}{b}$ انظر الشكل (13 ـ 1)

يشاهد في الشكل (13 ـ 1) التصرف الزمني لدور المفاعل الآني في حالة تزايد مميز لعدد النيترونات .



الشكل (13 ـ 1)

13 ـ 2 الدور المستقر للمفاعل t_e :

خلال تزايد عدد النيترونات بشكل أسي في مفاعل فوق الحرج يظل دور المفاعل الآني ثابتاً ولذلك سمي الدور المستقر للمفاعل . فالدور المستقر للمفاهل هي الفترة الزمنية التي يتزايد فيها عدد النيترونات من القيمة الأسية e=2,72 .

لدينا العلاقة :

$$t_e = \frac{t_2}{\ell n2}$$

t_e : الدور المستقر للمفاعل [s]

t_2 : زمن التضاعف [s]

$\ell n2 = 0,693$

ان الدور المستقر للمفاعل وزمن التضاعف يعتمدان على تفاعلية المفاعل .

مثال :

ما هي قيمة الدور المستقر لمفاعل فوق الحرج له تفاعلية تساوي 40 pcm ؟ .

من منحني معكوس الساعة نحصل على :

$$\rho = 40\ \text{pcm} \rightarrow t_2 = 120 \quad t_e = \frac{t_2}{\ell n2} = \frac{120\ \text{s}}{0{,}693} = 173\ \text{s}$$

اذن يبلغ الدور المستقر للمفاعل 173 s .

حساب الدور المستقر للمفاعل دون مساعدة منحني الساعة المعكوسة :

في مفاعل فوق الحرج بقليل $(0 < \rho \ll \beta)$ يجري حساب تقريبي للدور المستقر t_e .

$$t_e = \frac{\beta - \rho}{\lambda . \rho}$$

t_e : الدور المستقر للمفاعل [s]

ρ : التفاعلية [−]

β : جزء النيترونات المتأخرة .

λ : ثابتة التفكك $[s^{-1}]$

$$\beta_{U\text{-}235} = 0{,}0065$$

$$\lambda_{U\text{-}235} = 0{,}078\ s^{-1}$$

مثال :

$$\rho = 40\ \text{pcm} \rightarrow t_e = \frac{\beta - \rho}{\lambda . \rho} = \frac{0{,}0065 - 0{,}0004}{0{,}078\ s^{-1} . 0{,}0004} = 196\ \text{s}$$

هذه هي قيمة تقريبية لـ t_e ولكن القيمة الدقيقة هي t_e=173 s التي حُددت بمساعدة منحني الساعة المعكوسة .

في حالة مفاعل تقريباً حرج (ρ≪β) يمكن اهمال ρ في صورة المعادلة السابقة والدور المستقر يعطى عندئذ من العلاقة :

$$t_e = \frac{\beta}{\lambda.\rho} = \frac{\ell^{\cdot}}{\rho} \rightarrow t_e = \frac{0,15}{\rho}$$

t_e : الدور المستقر .

ρ : التفاعلية .

ان الدور المستقر للمفاعل يعطى أيضاً بوساطة زمن الحياة الوسطي $\ell^{\cdot}$ ($\ell^{\cdot}$=0,15) شريطة ان يكون هذا المفاعل حرجاً تقريباً .

تحديد الدور المستقر للمفاعل اعتماداً على التزايد النيتروني :

يمكن بشكل عام اعتماداً على التزايد النيتروني حساب عامل التزايد وزمن التضاعف ثم دور المفاعل . في المحطات النووية يجري عملياً قياس الزمن $t_{0,1}$ الذي يتزايد خلاله عدد النيترونات من 10% . يَسمح قياس $t_{0,1}$ بحساب دور المفاعل .

عند تزايد عدد النيترونات من 10% لدينا :

$$\frac{n_t}{n_0} = 1,1 \rightarrow \frac{t_{0,1}}{t_2} = 0,138 \rightarrow t_e = 7,3.t_{0,1}$$

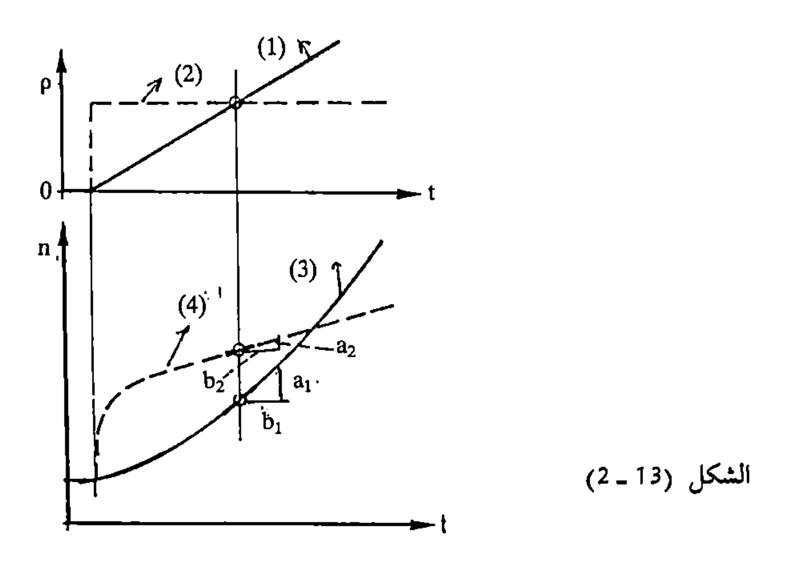
$$t_e = 10.t_{0,1}$$

13 ـ 3 الدور العابر للمفاعل :

اذا تغيرت التفاغلية ببطء في مفاعل فوق الحرج قليلاً فانه بالامكان في حالة التأرجح تفسير تغيُّر عدد النيترونات اللحظي بمساعدة الدور العابر للمفاعل .

اذا تزايدت التفاعلية ببطء (المنحني 1) في الشكل (13 ـ 2) يتزايد بذلك في حالة التأرجح عدد النيترونات (المنحني 3) «من أجل قيمة محددة للتفاعلية» بسرعة أكبر مما لو كانت التفاعلية ثابتة (المنحني 2) الأمر الذي ينجم عنه تزايد أصغر في عدد النيترونات (المنحني 4) .

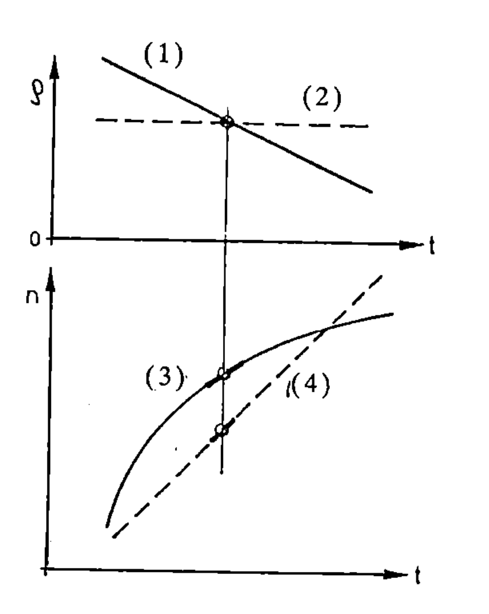
في الواقع ، من أجل قيمة محددة للتفاعلية فان التزايد $\frac{a_1}{b_1}$ هو أكبر من التزايد $\frac{a_2}{b_2}$ وبما ان معكوس الدور العابر يتناسب طرداً مع التزايد أي $\left(\frac{a}{b} \sim \frac{1}{t_e}\right)$ فان هذا الدور يكون أقصر من الدور المستقر العائد الى التفاعلية الثابتة (منحني 2) وبما ان $\left(\frac{a_2}{b_2} < \frac{a_1}{b_1}\right)$ فان الدور العابر هو أصغر من الدور المستقر .



الشكل (13 ـ 2)

واذا تناقصت التفاعلية ببطء (المنحني 1) في الشكل (13 ـ 3) يتزايد في حالة التأرجح عدد النيترونات (المنحني 3) «من أجل قيمة محددة للتفاعلية» بسرعة أصغر مما لو كانت التفاعلية ثابتة (المنحني 2) الأمر الذي ينجم عنه تزايد أكبر في عدد النيترونات (المنحني 4) . لذلك فان الدور العابر هو أكبر من الدور المستقر للأسباب التي وردت أعلاه .

تجري تغيرات بطيئة في التفاعلية لدى تحريك قضبان التحكم أو لدى تغيير تركيز البور في مهديء مفاعل الماء المضغوط .



الشكل (13 - 3)

يحسب الدور العابر للمفاعل في حالة التأرجح بطريقة سهلة بوساطة العلاقة :

$$t_e = \frac{\beta - \rho}{\lambda.\rho + \dot{\rho}}$$

t_e : الدور العابر للمفاعل [s]

ρ : التفاعلية [−]

$\dot{\rho}$: التغير الزمني للتفاعلية [s^{-1}]

β : جزء النيترونات المتأخرة [−]

λ : ثابتة التفكك [s^{-1}]

في حالة تفاعلية ثابتة لدينا $\dot{\rho} = 0$ والعلاقة السابقة تعطي قيمة الدور المستقر :

$$t_S = \frac{\beta - \rho}{\lambda.\rho}$$

مثال :

1 ـ ان التفاعلية تتزايد في الثانية الواحدة من القيمة 5 pcm .

آ ـ كم يبلغ الدور العابر لدى مفاعل فوق الحرج تفاعليته اللحظية 100 pcm .

ب ـ اجرِ المقارنة بين الدور المستقر والدور العابر لدى مفاعل فوق الحرج .

الدور العابر يعطى من العلاقة :

$$t_e = \frac{\beta-\rho}{\lambda.\rho+\dot{\rho}} = \frac{0{,}0065-0{,}001}{0{,}078\ s^{-1}.0{,}001+0{,}00005.s^{-1}} = 43{,}0\ s$$

يعطى الدور المستقر من العلاقة :

$$t_S = \frac{\beta-\rho}{\lambda.\rho} = \frac{0{,}0065-0{,}001}{0{,}078\ s^{-1}.0{,}001} = 70{,}5\ s$$

مثال :

2 ـ لدى سحب قضيب تحكم من مفاعل حرج ترتفع تفاعليته خلال دقيقتين من القيمة 240 pcm . ان ارتفاع التفاعلية يتناسب مع الزمن . كم يبلغ الدور العابر بعد مضي دقيقة ونصف من بداية سحب قضيب التحكم ؟

$$t_e = \frac{\beta-\rho}{\lambda.\rho+\dot{\rho}}$$

$$\dot{\rho} = \frac{\rho}{t} = \frac{240\ pcm}{120\ s} = 2\ pcm.s^{-1} = 0{,}00002\ s^{-1}$$

$$\rho=\dot{\rho}\ .t = 0{,}00002\ s^{-1}.90\ s = 0{,}0018$$

$$t_e = \frac{0{,}0065 - 0{,}0018}{0{,}078\ s^{-1}.0{,}0018 + 0{,}00002\ s^{-1}} = 29{,}3\ s$$

https://archive.org/details/@hassan_ibrahem

الفصل الرابع عشر

14 ـ تصرف المفاعل في مجال الاقلاع :

نناقش في هذه الفقرة التصرف الزمني لعدد النيترونات لدى تغيُّر كيفي في التفاعلية .

ان تغير التفاعلية في مجال الاقلاع (حيث يعتبر المنبع النيتروني مهملاً وحيث لا تتعلق بنية المفاعل بعدد النيترونات) لدى توضع معين لعناصر التحكم (مثلاً سحب قضبان التحكم أو اخراجها) .

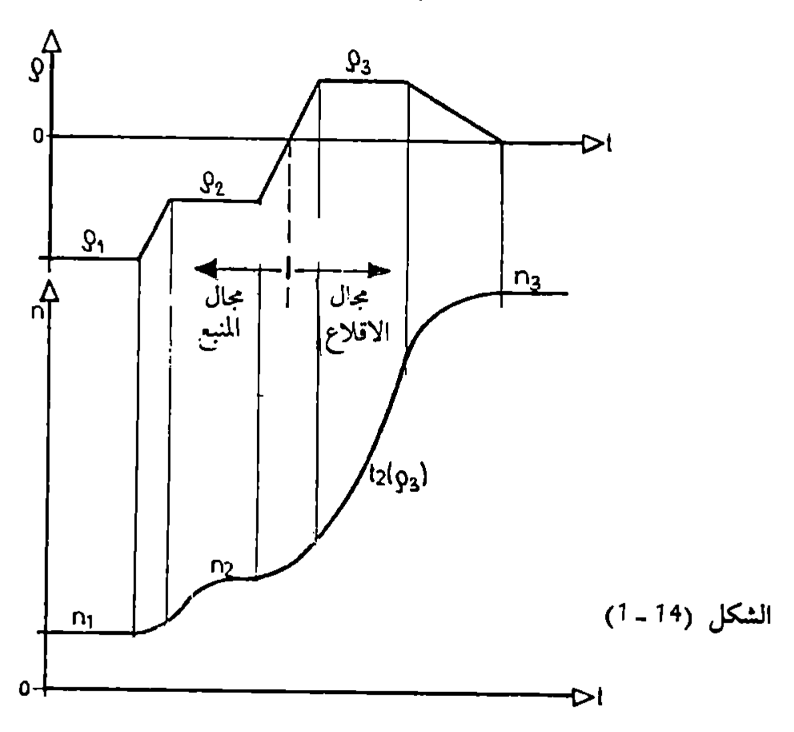
ان الاعتبارات التالية هي بالتأكيد سارية المفعول عندما يكون المفاعل فوق مجال الاقلاع أي في مجال الاستطاعة حيث يُؤْخذ بعين الاعتبار أن تغير التفاعلية لا يتأثر بعناصر التحكم فحسب وانما ايضاً بالاضطرابات العائدة الى تغيّرٍ في عدد النيترونات .

14 ـ 1 اقلاع المفاعل عند حالته تحت الحرجة :

عند اقلاع المفاعل بدءاً من حالته تحت الحرجة يلاحظ تصرف عدد النيترونات التالي : ان المفاعل تحت الحرج جداً لا زال في مجال المنبع ويحتوي على عدد متوازن n_1 من النيترونات يعتمد على حالة التفاعلية ρ_1 . ومن خلال سحب قضبان التحكم ترتفع قيمة التفاعلية الى ρ_2 . يتزايد بذلك عدد النيترونات حتى

يبلغ قيمة متوازنة جديدة n_2 . يجب الملاحظة هنا بان عدد النيترونات لا يستطيع التلاؤم مع الحالة الجديدة للتفاعلية جراء النيترونات المتأخرة إلا بعد زمن متأخر .

إذا واصلنا سحب قضبان التحكم يصبح المفاعل فوق الحرج : انه الآن في مجال الاقلاع . في حالةٍ فوق الحرجة ثابتةٍ يتزايد عدد النيترونات أسياً كما يشاهد في الشكل (14 ـ 1) . ان زمن التضاعف الذي يصف التزايد الأسي يعتمد بالطبع على حالة التفاعلية ρ_3 . (منحني الساعة المعكوسة) .



الشكل (14 ـ 1)

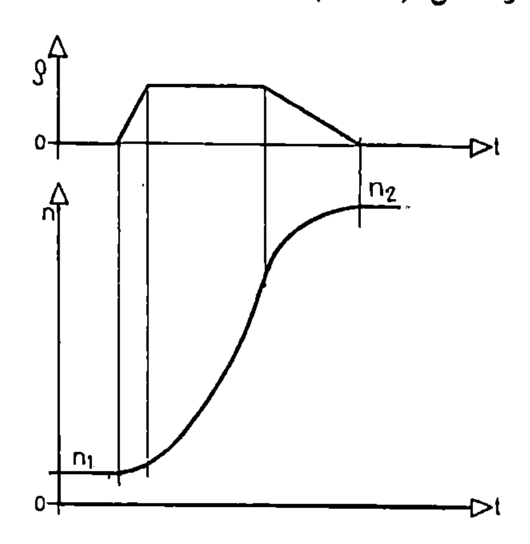
يجب الآن ان يستقر المفاعل عند القيمة ρ_3 ، وللوصول لهذا الهدف يجب الشروع بادخال قضبان التحكم ببطء حتى يصبح المفاعل حرجاً . بذلك يتسطح منحني عدد النيترونات ليصل الحالة المستقرة n_3. لفهم ذلك يجب الملاحظة بانه في مجال الاقلاع يمكن اهمال شدة المنبع في معادلة الموازنة . لذا فان المفاعل المستقر يجب ان يكون حرجاً في مجال الاقلاع .

14 ـ 2 تغيّر عدد النيترونات :

اذا رغبنا في تغيير عدد النيترونات يجب جعل المفاعل فوق الحرج أو تحت الحرج بقليل . يتغير بذلك عدد النيترونات أسيّاً ، وعند الوصول الى العدد الجديد من النيترونات يجب جعل المفاعل حرجاً مجدداً .

ارتفاع عدد النيترونات :

يحتوي المفاعل الحرج والمستقر على عدد قليل من النيترونات n_1 . ومن خلال اخراج قضبان التحكم يصبح المفاعل فوق الحرج . في مفاعل ثابت وفوق الحرج يرتفع عدد النيترونات أسيّاً . قبل الوصول الى عدد النيترونات n_2 الجديد بوقت قصير يجب جعل المفاعل حرجاً من جديد وذلك بادخال قضبان التحكم ببطء . بذلك يصبح ارتفاع عدد النيترونات مسطحاً ويبلغ عدد النيترونات عندئذ قيمته المتوازنة n_2 . انظر شكل (14 ـ 2) .

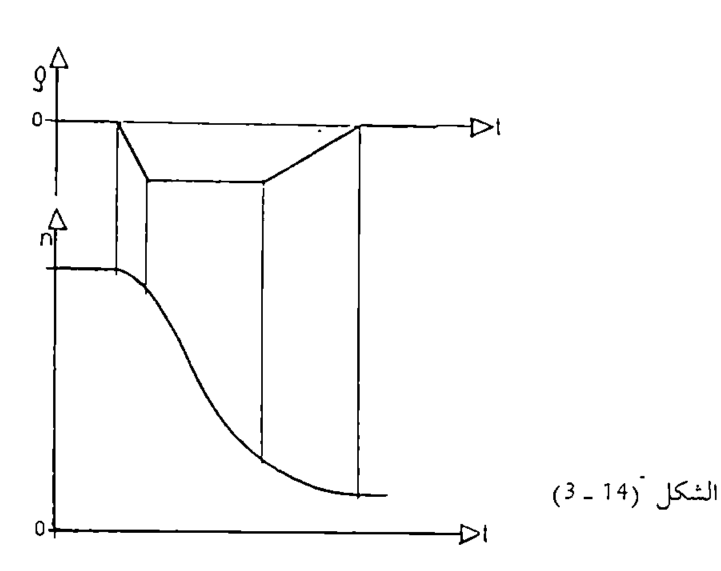


الشكل (14 ـ 2)

في مجال الاقلاع يجري التأثير على التفاعلية بوساطة قضبان التحكم التي تُشغل قبل وبعد ارتفاع عدد النيترونات الموضع ذاته لأن المفاعل يجب في الحالتين ان يكون حرجاً .

تخفيض عدد النيترونات :

يظهر أيضاً التصرف المذكور سابقاً في حالة تخفيض عدد النيترونات . اذا أريد الانقاص من عدد النيترونات جُعل المفاعل تحت الحرج . يتناقص بذلك عدد النيترونات أسيّاً ولدى وصول عدد النيترونات الى أدنى قيمته الجديدة يجب جعل المفاعل حرجاً مجدداً .



الشكل (14 ـ 3)

نناقش في الفقرة التالية تصرف المفاعل لدى تغير بطيء جداً في التفاعلية وأيضاً لدى تغير هذه التفاعلية بقفزة تلو الأخرى .

14 ـ 3 التغير البطيء في التفاعلية :

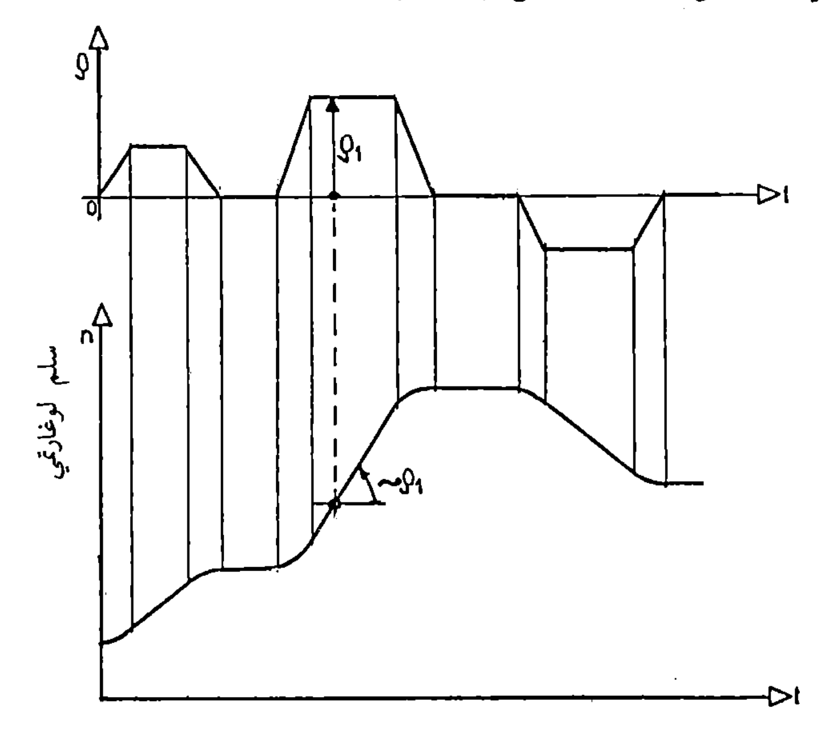
نستطيع ان نبين بان المفاعل يتصرف لدى تغير بطيء في التفاعلية كما لو كانت النيترونات المتأخرة غير موجودة .

معادلة التوازن $$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{\rho}{\wedge} . n$$

أو المعادلة : $$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{\rho}{\ell^*} . n$$

بما ان زمن الحياة الوسطي ℓ^{*} ($\ell^{*}=0,1\ s$) هو أكبر بألف مرة من زمن التوالد $\wedge$ ($\wedge\approx10^{-4}s$) ، فان عدد النيترونات يتغير ببطء تبعاً لقيمة ℓ^{*} .

في حالة تغير بطيء في التفاعلية يكون التغير اللوغارتمي لعدد النيترونات متناسباً مع التفاعلية . وبما ان السوابق هي دوماً في حالة اشباع فانه لا يظهر أي اهتزاز لدى تغير التفاعلية . تظهر هذه التغيرات البطيئة غالباً في حالة العمل العادي للمفاعل . انظر الشكل (14 ـ 4) .

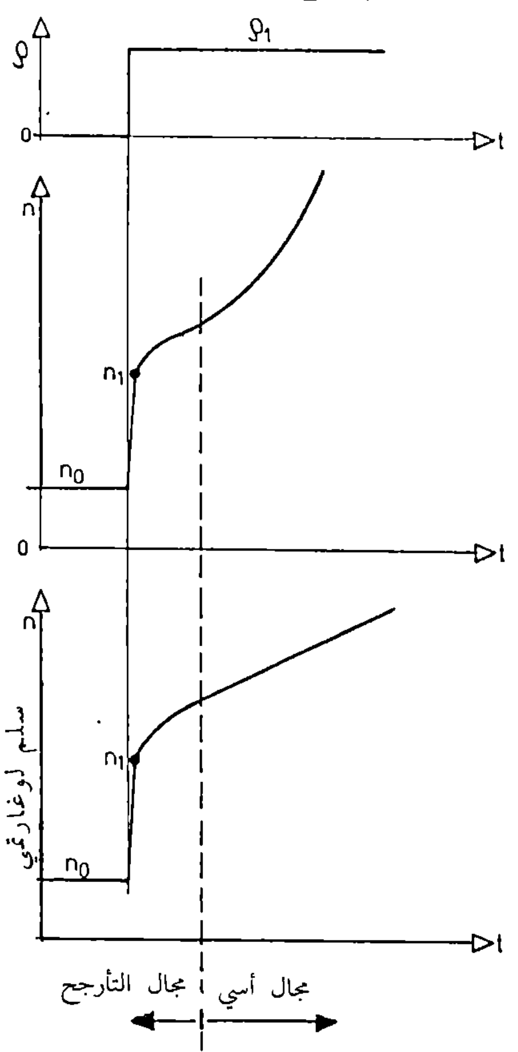


الشكل (14 ـ 4)

14 ـ 4 التغير الدرجي في التفاعلية :

تظهر لدى التغير الدرجي في التفاعلية اهتزازات واضحة بسبب النيترونات المتأخرة . يجري توضيح التصرف الزمني لعدد النيترونات من خلال ارتفاع درجي للتفاعلية .

يُجعل المفاعل الحرج فجأة فوق الحرج بذلك يتزايد عدد النيترونات بسرعة وخلال الملي ثانية الى قيمة أعلى n_1 شبه مستقرة . تعمل النيترونات الفورية وحدها على هذا التغير القفزي للنيترونات . يسمى هذا التصرف «القفزة الفورية» ويعتمد ارتفاع هذه القفزة على حالة التفاعلية ρ_1 . تُنْتَج بعد هذه القفزة ، جراء ارتفاع عدد النيترونات كثيرٌ من السوابق . تتفكك هذه السوابق خلال عمر النصف الذي يتروح بين 0,2 و 60 ثانية وتنبعث نيترونات متأخرة . تظهر خلال هذا التصرف اهتزازات نموذجية تدوم بضع ثوان . انظر الشكل (14 ـ 5) .



الشكل (14 ـ 5)

يتزايد عدد النيترونات أسياً بعد هذا الزمن التي تلاءمت السوابق الأكثر بطئاً خلاله مع الوضع الجديد أو الحالة الجديدة .

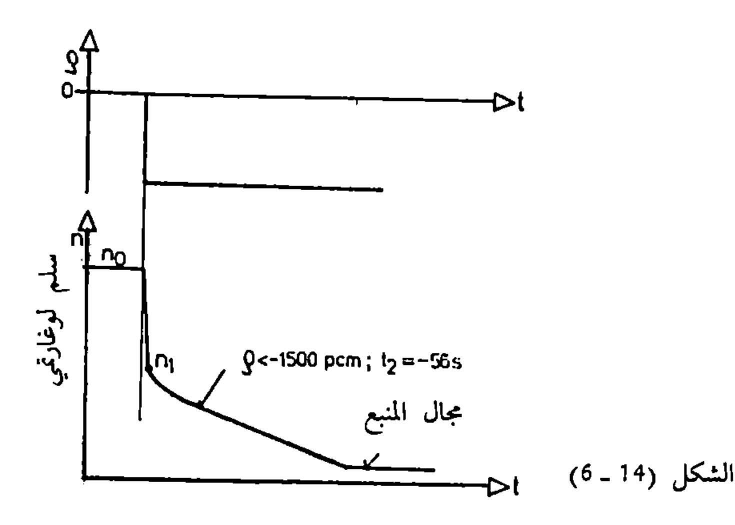
ان التصرف ذاته يظهر أيضاً عند جعل المفاعل تحت الحرج بشكل قفزة . يستفاد من القفزة الفورية السالبة عندما نريد لأسباب أمنية الانقاص السريع من قيمة عدد النيترونات أي من قيمة الاستطاعة .

14 ـ 5 التوقف السريع للمفاعل :

اذا جعلنا المفاعل الحرج فجأة تحت الحرج وذلك بادخال قضبان التحكم فان عدد النيترونات ينخفض بسرعة . هذه الطريقة تسمى التوقف السريع للمفاعل . ويجري التوقف السريع كالآتي : في معظم المفاعلات تكون قضبان التحكم معلقة من الأعلى مغنطيسياً . وإذا قُطع التيار المغنطيسي تسقط قضبان التحكم سقوطاً حراً . وفي مفاعلات الماء المغلي تدخل قضبان التحكم هيدروليكياً من الأسفل .

ان عدد النيترونات شبه المستقرة n_1 الذي نتج عن قفزة نوعية يعتمد على الحالة تحت الحرجة للمفاعل ويعطى من العلاقة :

$$n_1 = \frac{n_0}{1 - \rho_n}$$



الشكل (14 ـ 6)

مثال :

يشغّل مفاعل وقوده U-235 بدءاً من عدد النيترونات 10^{15} . ولدى توقف المفاعل بسرعة يصبح تحت الحرج وعندئذ تفاعليته هي 10000 pcm . ما هي القيمة التي بلغها عدد النيترونات مباشرة بعد توقف المفاعل ؟

$$n_1 = \frac{n_0}{1 - \rho_n}$$

$$\rho_n = \frac{\rho}{\beta} = \frac{-0,1}{0,0065} = -15,4$$

$$n_1 = \frac{10^{15}}{1 + 15,4} = 6,10.10^{13}$$

يقفز عدد النيترونات مباشرة بعد توقف المفاعل ويبلغ عندئذ 6.10^{13} .

تستعمل القفزة الفورية غالباً لتعيير قضبان التحكم . اذا قيس عدد النيترونات قبل وبعد القفزة فان هذين القياسين يسمحان بحساب تفاعلية قضبان التحكم . ان العبارة التالية تسمح بحساب التفاعلية العائدة لهذه القفزة .

$$\boxed{\rho_n = -\left(\frac{n_0}{n_1} - 1\right)}$$

مثال :

عند توقف المفاعل يهبط عدد النيترونات من القيمة 10^{13} الى القيمة 10^{12} .

ما هي قيمة التفاعلية بالوحدات [pcm] ρ .

علماً بأن مادة الوقود هي U-235 .

$$\rho_n = -\left(\frac{n_0}{n_1} - 1\right) = -\left(\frac{10^{13}}{10^{12}} - 1\right) = -9$$

$$\rho_n = \frac{\rho}{\beta} \rightarrow \rho = \rho_n.\beta = -9.0,0065 = -5,85.10^{-2} = -5850 \text{ pcm}$$

اذن اصبح المفاعل تحت الحرج بتفاعلية تساوي 5900 pcm−

عدد النيترونات واستطاعة المفاعل :

بوساطة التوقف السريع للمفاعل يمكن خفض استطاعة المفاعل الاجمالية بسرعة كبيرة . يجب الانتباه مع ذلك بان الجزء الفوري من الاستطاعة يتبع بدقة التصرف الزمني لعدد النيترونات .

استخراج المعادلة لحساب توقفٍ سريع للمفاعل :

تستخرج هذه المعادلة من المعادلات التحريكية التالية :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{\rho-\beta}{\Lambda}.n + \lambda.C$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{\beta}{\Lambda}.n - \lambda.C$$

قبل حدوث القفزة الفورية يحتوي المفاعل الحرج $\rho=0$ على عدد من النيترونات والسوابق يساوي n_0 و C_0 على التوالي .

$$\frac{\Delta C_0}{\Delta t} = 0 \rightarrow \frac{\beta}{\Lambda}.n_0 = \lambda.C_0$$

إبان حدوث القفزة يكاد العدد الكبير من السوابق $(C_0 \simeq 1000\ C_0)$ لا يتغير . وبذلك يتغير انتاج النيترونات المتأخرة قليلاً جداً .

لدينا مباشرة بعد القفزة المعادلة :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{\rho-\beta}{\Lambda}.n + \frac{\beta}{\Lambda}.n_0$$

في حالة مفاعل فوري تحت الحرج $(\rho<\beta)$ يكون المقدار $\frac{n.(\rho-\beta)}{\Lambda}$ سالباً ويتناقص لذلك أسياً بسرعة كبيرة . أما المقدار $\frac{\beta}{\Lambda}\ n_0$ فهو موجب وثابت . ويبلغ عدد النيترونات بذلك خلال زمن قصير جداً القيمة المتوازنة تقريباً .

(المتوازنة تقريبا تعني $\frac{\Delta n}{\Delta t} = 0$) ومنه المعادلة :

$$0 = \frac{\rho-\beta}{\wedge}.n_1 + \frac{\beta}{\wedge}.n_0$$

هذه المعادلة التي تحتوي على عدد النيترونات n_0 و n_1 قبل وبعد القفزة تسمح بحساب القفزة الفورية .

المعادلة هذه تقدم n_1 .

$$\frac{n_1(\beta-\rho)}{\wedge} = \frac{\beta.n_0}{\wedge}$$

ومنه :
$$n_1 = \frac{\beta n_0}{\beta-\rho}$$

أو :
$$n_1 = \frac{n_0}{1-\rho_n}$$

لأن :
$$\rho_n = \frac{\rho}{\beta}$$

ملحق /١/

معادلة معكوس الساعة

للحصول على معادلة معكوس الساعة ننطلق من معادلة الانتشار التالية :

$$D\triangle\phi(r,t) - \Sigma_a.\phi(r,t) + S = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial\phi}{\sigma t} \quad (1)$$

حيث :

$\phi(r,t)$ ـ التدفق النيتروني $[n.cm^{-2}.s^{-1}]$ أي عدد النيترونات للسنتمتر المربع وللثانية .

D ـ ثابتة الانتشار $[cm^{-1}]$

S ـ منبع سطحي للنيترونات $[n.cm^{-2}.s^{-1}]$

Σ_a ـ مقطع الامتصاص العياني $[cm^{-1}]$

يقسم المنبع الى جزئين :

$$S = S_p + S_d$$

S_p $[n.cm^{-1}.s^{-1}]$ هو حد عائد للنيترونات الفورية بينما S_d هو حد عائد للنيترونات البطيئة .

لدينا كما هو معلوم من نظرية المفاعلات النووية :

$$S_p = (1-\beta)\ K\ \Sigma_a\ \phi(r,t).e^{-B^2.\tau}$$

$$S_d = \Sigma_i\ C_i\ (r,t)\ \lambda_i\ e^{-B^2.\tau}$$

حيث : $\beta=\Sigma\beta_i$ هو مجموع زمر النيترونات المتأخرة وB^2 هو التحدب الهندسي $[cm^{-2}]$ بينما $\tau[cm^2]$ هو عمر «فيرمي» أو طول مسار الاكتباح .

$C_i(r,t)$ عدد النوى الأم العائد الى الزمرة i و λ_i هي ثابتة التفكك لهذه الزمرة .

ان $C_i(r,t)$ تحقق المعادلة :

$$\frac{dC_i}{dt} = -\lambda_i C_i(r,t) + \beta_i \frac{K}{p} .\Sigma_a.\phi(r,t) \qquad (2)$$

حيث : $-\lambda_i C_i(r,t)$: هو عدد التفككات في الثانية .

$\beta_i \frac{K}{p} .\Sigma_a.\phi(r,t)$ هو الناتج في الثانية و $K= \frac{\Sigma_a}{D}$

أما p فهو احتمال افلات النيترون من الرنين وهي قيمة لا واحدة لها .

تعوض قيم S_p وS_d في معادلة الانتثار (1) فنحصل على المعادلة :

$$D\Delta\phi - \Sigma_a\phi + (1+\beta)\ K\Sigma_a\ \phi e^{-B^2\tau} + \Sigma_i C_i \lambda_i p e^{-B^2\tau} \qquad (3)$$

من أجل حل المعادلتين (2) و(3) نفصل $C_i(r,t)$ و$\phi(r,t)$ كل منهما الى تابعين متعلقين بالزمن t وبالموضع r أي :

$$C_i\ (r,t) = C_i\ (r).H_i\ (t) \qquad (4)$$

$$\phi\ (r,t) = R\ (r).T\ (t) \qquad (5)$$

نعوض في المعادلة (2) :

$$C_i\dot{H}_i = -\lambda C_i H_i + \beta_i \frac{K}{p}\ \Sigma_a\ R.T$$

$$\dot{H} = -\lambda H_i + \beta_i\ \frac{k}{p}\ \Sigma_a.T\ ;\ \dot{H} = \frac{d}{dt}H$$

$$\frac{1}{T}\ (\dot{H}_i+\lambda H_i) = \beta_i\ \frac{K}{p}\ \Sigma_a\ \frac{R}{C_i} \qquad (6)$$

بما أن الجهة اليسرى من هذه المعادلة مكونة من توابع تتعلق بالزمن ، والجهة اليمنى مكونة من توابع تتعلق بالموضع ، يتوجب أن تساوي كل جهة قيمة ثابتة . هذا يعني أن R و C_i تتناسب بعضها مع البعض .

نعوض المعادلتين (4) و (5) في (3) فنحصل على المعادلة :

$$D.T.\Delta R - \Sigma_a.T.R + (1-\beta).K.\Sigma_a .T.R\, e^{-B^2\tau}$$

$$+ \Sigma_i C_i.H_i\lambda_i\, p\, e^{-B^2\tau} = \frac{1}{v}\; R.\dot{T}/R.T.\Sigma_a \;;\; \dot{T} = \frac{d}{dt}T \qquad (7)$$

$$L^2.\frac{\Delta R}{R} - 1+(1-\beta)Ke^{-B^2\tau} + \Sigma_i.\frac{C_i}{R}.\frac{H_i}{T}\;\lambda_i\; p\,\frac{e^{-B^2\tau}}{\Sigma_a} = \ell_0.\frac{\dot{T}}{T}$$

نعلم أن الحالة الحرجة للمفاعل تخضع للمعادلة :

$$\frac{\Delta\phi}{\phi}\; n = -B^2 \qquad (8)$$

أو :

$$\frac{\Delta R}{R} = -B^2$$

لدى تقسيم المعادلة (7) على $1+L^2B^2$ نحصل على المعادلة :

$$(1-\beta).K_{eff}-1 + \Sigma_i\frac{C_i}{R}.\frac{H_i}{T}.\lambda_i\;\frac{p}{K\Sigma_a}K_{eff} = \ell\;\frac{\dot{T}}{T} \qquad (9)$$

حيث : L هو طول الانتشار الحراري ، ℓ_0 هو زمن الانتشار و

$\ell = \dfrac{\ell_0}{1+B^2L^2}$ هو زمن الانتشار في نظام متناه .

ان المعادلتين (6) و (9) هما خطيتان ويحتويان فقط على متغير هو الزمن . لذا نفرض حلين خاصين هما :

$$\phi(r,t) = \phi_0(r)e^{\omega t} \;;\; C_i(r,t) = C_{i0}(r)e^{\omega t} \qquad (10)$$

نعوض (10) في المعادلة (2) فنحصل على :

$$C_{i0}\omega e^{\omega t} = -\lambda_i C_{i0}e^{\omega t} + \beta_i . \frac{K}{p} \Sigma_a \phi_0 e^{\omega t} \quad (11)$$

إذن :

$$C_{io} = \frac{\beta_i K \Sigma_a . \phi_0}{p(\omega+\lambda_i)}$$

ثم نعوض (10) في (3) فنحصل على :

$$(1-\beta)K_{eff}-1 + \Sigma_i \frac{C_{i0}e^{\omega t}}{\phi_0 e^{\omega t}} \lambda_i \frac{p}{K\Sigma_a} . K_{eff} = \ell\omega \quad (12)$$

نعوض في هذه المعادلة عن C_{i0} بقيمتها فنجد :

$$\frac{K_{eff}-1}{K_{eff}} = \frac{\ell\omega}{K_{eff}} + \Sigma_i \frac{\beta_i . \omega}{\omega+\lambda_i} \quad (13)$$

ان المقدار $\frac{K_{eff}-1}{K_{eff}}$ هو ذو أهمية كبيرة في ديناميك المفاعلات ويطلق عليه اسم التفاعلية ρ .

اذن نستطيع أن نكتب :

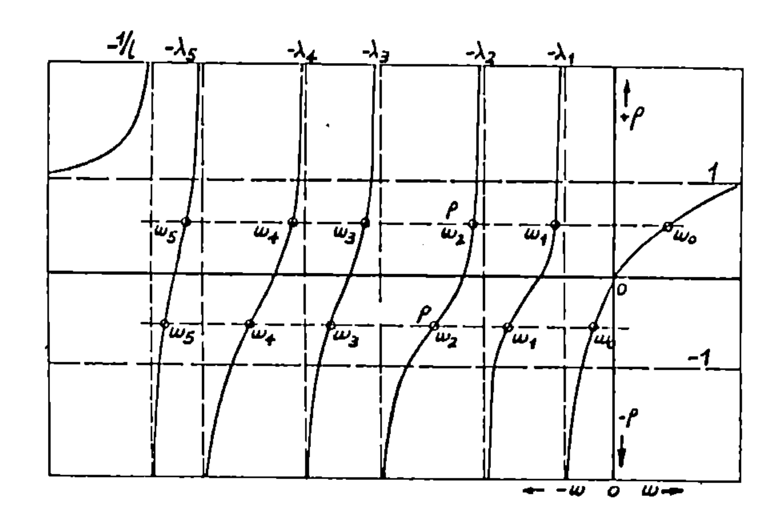
$$\frac{K_{eff}-1}{K_{eff}} = \rho \quad (14)$$

وبما أن : $K_{eff}= \frac{1}{1-\rho}$ نحصل على :

$$\rho= \frac{\ell\omega}{K_{eff}} + \Sigma_i \frac{\beta_i\omega}{\omega+\lambda_i} \quad (15)$$

أو :

$$\rho= \frac{\ell\omega}{1+\ell\omega} + \frac{1}{1+\ell\omega} \Sigma_i \frac{\beta_i\omega}{\omega+\lambda_i} \quad (16)$$



ان اشارة Σ_i تشتمل على خمس قيم ولهذا فان المعادلة (16) هي من الدرجة السادسة للمتغير ω ولها ستة حلول كل منها بدلالة ω . ان منحني ρ في المعادلة (16) هو أعلاه .

ان للمعادلة (16) خمسة أقطاب هي λ_i(i=1.2....5) بالإضافة الى القطب $\omega = -\frac{1}{\ell}$.

من الناحية الفيزيائية فان المجال $|\rho| < 1$ يكتسب أهمية كبرى . من أجل قيمة محددة لـ ρ فان لهذه المعادلة ستة جذور هي :

$$\omega_0, \omega_2, \omega_2, \ldots, \omega_5$$

اذن يكون الحل العام لهذه المعادلة على الشكل التالي :

$$\phi = \phi_0 \left[A_0 e^{\omega_0 t} + A_1 e^{\omega_1 t} + \ldots + A_5 e^{\omega_5 t}\right] \qquad (17)$$

بعد مضي زمن قصير يبقى فقط الحد الأول من هذه المعادلة . هذا يعني الحد العائد الى الزمرة ذات عمر النصف الأطول والذي يكتسب أهمية بينما لا تساهم الحدود الخمسة الباقية بشكل هام :

$$\phi = \phi_0 e^{\omega_0 t} = \phi_0 e^{t/T} \qquad (18)$$

حيث T يرمز الى دور المفاعل المستقر . نعوض ω في معادلة ρ فنحصل على :

$$\rho = \frac{\ell}{T.K_{eff}} + \Sigma_i \frac{\beta_i}{1+\lambda_i.T} \qquad (19)$$

ان واحدة التفاعلية التي تؤول الى دور مستقر قدره ساعة تسمى معكوس الساعة ومعادلة معكوس الساعة المعروفة هي :

$$\rho = \frac{\dfrac{\ell}{T.K_{eff}} + \Sigma_i \dfrac{\beta_i}{1+\lambda_i T}}{\dfrac{\ell}{3600K_{eff}} + \Sigma_i \dfrac{\beta_i}{1+3600\lambda_i}} \qquad (20)$$

ان التفاعلية ρ في هذه المعادلة يعبَّر عنها بواحدة معكوس الساعة .

حالة زمرة واحدة من النيترونات المتأخرة :

لدى اعتبار زمرة واحدة من النيترونات المتأخرة فان المعادلة التي تربط ρ و ω يمكن تبسيطها على الشكل التالي :

في حالة مفاعل حراري لدينا المعطيات التالية :

$$\ell = 10^{-3}\ s \ ;\ \beta = 0{,}0075$$

$$\text{U-235: } \bar{\lambda} = \frac{\beta}{\Sigma\beta_i t_i} = 0{,}085.s$$

$$\rho = 0{,}0025 \ ;\ K_{eff} \simeq 1$$

ان معادلة ρ تصبح الآن :

$$\rho = \frac{\ell\omega}{K_{eff}} + \frac{\beta\omega}{\omega+\lambda} \qquad K_{eff} \quad 1$$

أو :

$$\rho = \ell\omega + \frac{\beta\omega}{\omega+\lambda}$$

$$\ell\omega^2 + (\ell\lambda - \rho + \beta)\,\omega - \lambda\rho = 0$$

$$\omega_{0/1} = \frac{\rho-\ell\lambda-\beta \pm \sqrt{(\rho-\ell\lambda-\beta)^2 + 4\ell\rho\lambda}}{2\,\ell}$$

$$\omega_{0/1} = \frac{1}{2\ell}\left[\rho-\ell\lambda-\beta \pm (\ell\lambda+\beta-\rho)\,.\,\sqrt{1+\frac{4\ell\rho\lambda}{(\ell\lambda+\beta-\rho)^2}}\right]$$

$$= -\frac{\ell\lambda+\beta-\rho}{2\ell}\left[1 \mp \left(1+\frac{2\ell\rho\lambda}{(\ell\lambda+\beta-\rho)^2}\right)\right]$$

بذلك نحصل على الحلين :

$$\omega_0 = \frac{\rho\lambda}{\ell\lambda+\beta-\rho} \sim \frac{\rho\lambda}{\beta-\rho}$$

$$\omega_1 = -\frac{\ell\lambda+\beta-\rho}{\ell} - \frac{\rho\lambda}{\ell\lambda+\beta-\rho} = \sim -\frac{\beta-\rho}{\ell}$$

ان الحلول العامة لـ ϕ و C تكتب الآن :

$$\phi = A_0 e^{\omega_0 t} + A_1 e^{\omega_1 t} \qquad (21)$$

$$C = B_0 e^{\omega_0 t} + B_1 e^{\omega_1 t} \qquad (22)$$

من بين الثوابت الأربع هناك ثابتتان لا تتعلقان ببعضهما البعض لأن ϕ و C في المعادلة (2) مرتبطان ببعضهما البعض . لتحديد الثابتتين المستقلتين ، ننطلق من الشرطين الابتدائيين التاليين :

$$\phi = \phi_0$$

من أجل $t = 0$

$$\frac{\delta C}{\delta t} = 0 \qquad (23)$$

لدى التعويض عن ϕ و C بقيمهما في المعادلة (2) نحصل على :

$$B_0\omega_0 e^{\omega_0 t} + B_1\omega_1 e^{\omega_1 t} = -\lambda\,(B_0 e^{\omega_0 t} + B_1 e^{\omega_1 t}) + \qquad (24)$$

$$+ \frac{K}{P}\,\Sigma_a\beta\,(A_0 e^{\omega_0 t} + A_1 e^{\omega_1 t})$$

ولدى مقارنة أمثال $e^{\omega_0 t}$ و $e^{\omega_1 t}$ نحصل على :

$$B_0 = \frac{K}{p(\omega_0+\lambda)}\,\Sigma_a.\beta.A_0 \qquad (25)$$

$$B_1 = \frac{K}{p(\omega_1+\lambda)}\,.\,\Sigma_a.\beta.A_1$$

في (25) معادلتان من مجهولين ω_0 و ω_1 يجرى حلهما فنحصل على :

$$B_0 = \frac{K(\beta-\rho)\,\Sigma_a.A_0}{p\lambda}$$

$$B_1 = -\frac{K\beta.\ell\,\Sigma_a.A_1}{p(\beta-\rho)}$$

إما الشروط الابتدائية فَتُعْطي :

$$\phi_0 = A_0 + A_1 \ ; \ \omega_0 B_0 + \omega_1 B_1 = 0$$

مما تقدم نستطيع حساب الثوابت التالية :

$$A_0 = \frac{\beta}{\beta-\rho}.\phi_0 \; ; \; A_1 = \frac{-\rho}{\beta-\rho}.\phi_0$$

حيث أننا نهمل $\frac{\beta.\ell}{\beta-\rho}$ تجاه $\frac{\beta}{\lambda}$ ونهمل أيضاً $\frac{\rho.\ell}{\beta-\rho}$ تجـاه $\frac{\beta-\rho}{\lambda}$.

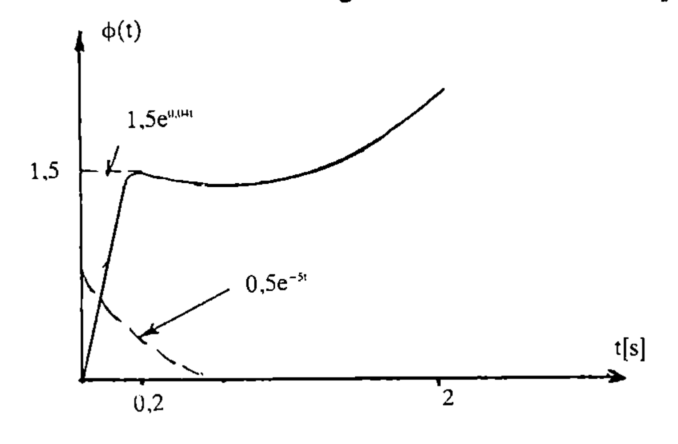
بذلك نحصل على معادلة التدفق :

$$\phi = \phi_0 \left[\frac{\beta}{\beta-\rho} e^{\frac{\lambda\rho}{\beta-\rho}.t} - \frac{\rho}{\beta-\rho} e^{\frac{\beta-\rho}{\ell}.t} \right] \quad (26)$$

لدى التعويض عن $(\beta, \rho, \lambda, \ell)$ بقيمها العددية نحصل على :

$$\phi = \phi_0 \left[1,5\, e^{0,04t} - 0,5\, e^{-5t}\right]$$

حيث أن الحد $(1,5e^{0,04t})$ يحتوي على الدور المستقر للمفاعل والحد الآخر أي $0,5e^{-5t}$ يحتوي على الدور العابر للمفاعل .



الشكل (2)

ان تأثير الحد الثاني في المعادلة (26) مهمل بعد زمن قصير جداً ويبقى :

$$\phi = \phi_0 . \frac{\beta}{\beta-\rho} e^{\frac{\lambda\rho}{\beta-\rho} . t}$$

يعطى الدور المستقر بالعلاقة :

$$(27) \qquad T = \frac{\beta-\rho}{\lambda\rho} \quad ; \lambda = \frac{\beta}{\Sigma\beta_i t_i}$$

الصعود الفوري للتدفق :

نبحث الآن عن صعود التدفق ϕ مباشرة بعد تغيُّر قفزي للتفاعلية . لذلك نشتق التدفق بالنسبة للزمن :

$$(28) \qquad \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} \right)_{t=0} = (A_0\omega_0 + A_1\omega_1).\phi_0$$

$$= \left(\frac{\beta}{\beta-\rho} . \frac{\lambda\rho}{\beta-\rho} + \frac{\rho}{\beta-\rho} . \frac{\beta-\rho}{\ell} \right) \phi_0$$

أو :

$$\frac{1}{\phi_0} \frac{\partial\phi_0}{\partial t} = \frac{\beta\lambda\rho}{(\beta-\rho)^2} + \frac{\rho}{\ell} = \frac{1}{T_0}$$

وبما أن :

$$(29) \qquad \phi = \phi_0 e^{t/T}$$

و :

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{\phi_0}{T} e^{t/T}$$

نحصل عند $t = 0$ على :

$$\frac{1}{\phi_0} \frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{1}{T_0}$$

وبما أن المقدار $\frac{\beta\lambda\rho}{(\beta-\rho)^2}$ مهمل تجاه $\frac{\rho}{\ell}$ نحصل بالنهاية على :

$$T_0 \sim \frac{\ell}{\rho} \tag{30}$$

وبما أن التدفق من أجل النيترونات السريعة هو :

$$\phi = \phi_0 \, e^{\frac{K_{eff}-1}{\ell}} \tag{31}$$

لدى مقارنة المعادلة (29) مع (31) نحصل على :

$$T = \frac{\ell}{K_{eff}-1} \sim \frac{\ell}{\rho}$$

إذن ، فان تصاعد التدفق الناتج عن تغير قفزي للتفاعلية ناتج عن النيترونات الفورية .

مناقشة الحالة لدى اعتبار النيترونات البطيئة :

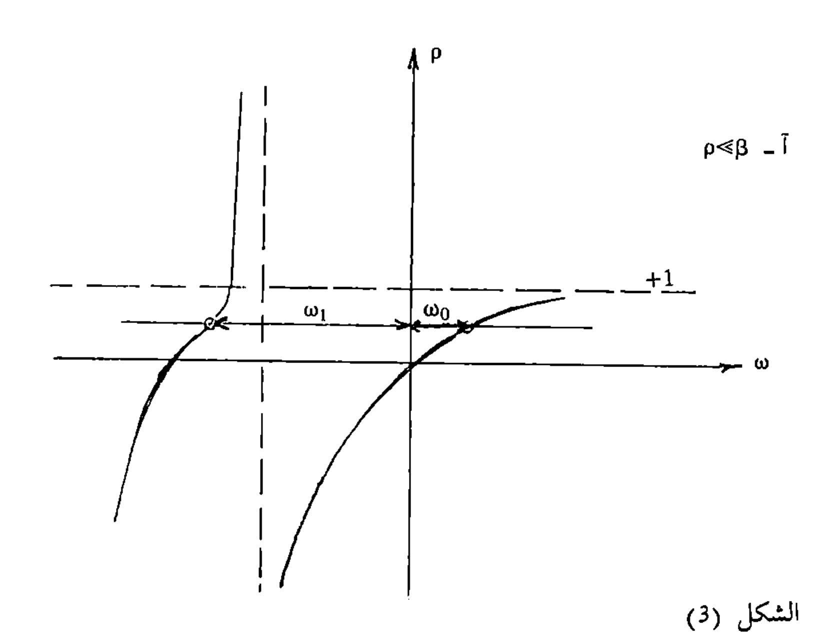
تقتصر المناقشة على حالتين هما : $\rho \ll \beta$ و $\rho \gg \beta$:

آ ـ $\rho \ll \beta$:

$\omega_0 \ll \lambda_i$ تعطي :

$$\rho = \frac{\ell\omega_0}{K_{eff}} + \Sigma \frac{\beta_i\omega_0}{\lambda_i}$$

نضع $\omega_0 = \frac{1}{T}$ فنحصل على :



الشكل (3)

$$T = \frac{1}{\rho}\left[\frac{\ell}{K_{eff}} + \Sigma\, \beta_i t_i\right]$$

اذا أخذنا بعين الأعتبار أن :

$$\lambda = \frac{\beta}{\Sigma\, \beta_i t_i} \; ; \; \Sigma\beta_i t_i = \frac{\beta}{\lambda}$$

نحصل على :

$$T = \frac{1}{\rho}\left[\frac{\ell}{K_{eff}} + \frac{\beta}{\lambda}\right]$$

أي :

$$T \sim \frac{\beta}{\rho\lambda}$$

لأن :

$$\frac{\ell}{K_{eff}} \ll \frac{\beta}{\lambda}$$

بذلك نحصل على ذات النتيجة لدى اعتبار زمرة واحدة من النيترونات المتأخرة .

ب ـ $\rho \gg \beta$, $\lambda_i \ll \omega_0$

$$\rho = \frac{\ell\omega}{K_{eff}} + \Sigma\, \beta_i$$

$$\rho = \frac{\ell.\omega}{K_{eff}} + \beta \;;\; \beta = \Sigma\, \beta_i$$

$$T = \frac{\ell}{K_{eff}\,(\rho - \beta)} \rightarrow T \sim \frac{\ell}{\rho}$$

لأن $\rho \gg \beta$ و $K_{eff} \sim 1$ في حالة مفاعل حرج .

اذن $\frac{\ell}{\rho}$ ~ T هو دور مفاعل حرج فوري .

ـ مثال :

1 ـ في مفاعل متجانس عارٍ وقوده U-235 يجري رفع قيمة التفاعلية ρ عند الزمن $t=t_0$ فجأة من المقدار 5% (هذا يعني من القيمة صفر الى 0,05) . ان زمن التوالد ℓ يبلغ 2.10^{-4} ثانية واستطاعة المفاعل عند الزمن t_0 تبلغ واطاً واحداً .

احسب الطاقة المحررة بالكيلوواط ساعة خلال الزمن t_0 حتى $t_0+0,1$ ثانية .

الحل :

بما أن $\rho > \beta$ فان المفاعل يعتبر حرجاً فورياً أي :

$$T \simeq \frac{\bar{\ell}}{\rho} = 4.10^{-3}\ s$$

تتزايد الاستطاعة خلال أربع ميلي ثانية من المقدار e وبعد 0,1 ثانية نحصل على الطاقة الكلية المحررة بالعلاقة :

$$E = \int_{0}^{0,1} P_0 \, e^{t/T} \, dt \ , \ P_0 = 1 \ W$$

$$P_0.T \ (e^{25}-1) \ = \ 80 \ KWh$$

2 ـ في مفاعل متجانس حراري وعار (U-235) يشتغل باستطاعة ثابتة ، برفع عامل التكاثر الفعال K_{eff} عند الزمن t_0 من القيمة واحد من ألف (1%o) . يبلغ زمن الانتثار ℓ: 10^{-4} ثانية .

احسب باستخدام زمرة واحدة من النيترونات المتأخرة التدفق النيتروني الحراري ϕ/ϕ_0 .

الحل :

يعطى التدفق الحراري لزمرة واحدة من النيترونات المتأخرة بالعلاقة :

$$\phi(t) \ = \ \phi(t_0)\left\{ \ \frac{\beta}{\beta-\rho} \, e^{\frac{\lambda\rho}{\beta-\rho} \cdot t} \ - \ \frac{\rho}{\beta-\rho} \, e^{-\frac{\beta-\rho}{\ell} \cdot t} \right\}$$

لدى تعويض القيم التالية :

$\beta \ = \ 0,0075$

$\rho \ = \ 0,001$

$\ell \ = \ 0,0001 \ sec$

$\lambda \ = \ 0,08 \ sec^{-1}$

نحصل على :

$$\frac{\phi(t)}{\phi(t_0)} \ = \ 1,15 \ e^{0,0123t} \ - \ 0,154 \ e^{-65t}$$

يبلغ اذن الدور المستقر (81 sec) .

2 ـ احسب في مفاعل يبلغ فيه زمن الانتشار 10^{-4} ثانية ، التفاعلية اللازمة للحصول على دور يبلغ 10^{3} ثانية و 10^{2} ثانية و 10 ثوان .

الحل :

وفقاً للعلاقة : $T = \frac{\beta - \rho}{\lambda \rho}$

نحصل على : $\rho = \frac{\beta}{\lambda T + 1}$

وفي حالة : $\lambda = 0,08$ و $\beta = 0,0075$ لدينا النتائج التالية :

T	ρ
1000 sec	$9,4.10^{-5}$
100 sec	$8,3.10^{-4}$
10 sec	$4,2.10^{-3}$

4 ـ لدينا مفاعل متجانس وعار بدأ يكون حرجاً . يتكون هذا المفاعل من محلول مائي ويحتوي على 2,5 Kg U-235 . يضاف 100 g U-235 .

ان احتمال امتصاص نيترون وأسره من قبل U-235 يبلغ 0,9 . يبلغ زمن التوالد الوسطي $\overline{\ell}=0,039$ ثانية .

احسب دور المفاعل T، أي الزمن التي تكبر الاستطاعة خلاله من القيمة e .

الحل :

نحسب أولاً تغير K_{eff} الذي يسمح بحساب التفاعلية ودور المفاعل .

. $K_{eff} = f.\eta$

لأن : $\varepsilon = p = 1$

$$\Delta K_{eff} = \Delta f.\eta + f.\Delta\eta$$

ان η هو تابع للمقطع العياني الفعال لليورانيوم 235 . لدى التغير العياني يبقى η ثابتاً أي $\Delta\eta = 0$ ومنه :

$$\Delta K_{eff} = \eta . \Delta f$$

$$\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}} = \frac{\Delta f}{f}$$

وبالكتابة التفاضلية لدينا :

$$df = \left(\frac{d}{d\Sigma^U} f \right) d\Sigma_a^u$$

$$= \frac{d}{d\Sigma^U} \left(\frac{\Sigma_a^u}{\Sigma^U + \Sigma_a^{M'}} \right) d\Sigma_a^u$$

$$= \left[\frac{1}{\Sigma_a^u + \Sigma_a^M} - \frac{\Sigma_a^u}{(\Sigma_a^u + \Sigma_a^M)^2} \right] d\Sigma_a^u$$

$$= \frac{d\Sigma_a^u}{\Sigma_a^u + \Sigma_a^M} (1-f)$$

$$\frac{df}{f} = \frac{d\Sigma_a^u}{\Sigma_a^u} (1-f)$$

بعد تعويض القيم العددية لدينا :

$$\frac{df}{f} = \frac{dK_{eff}}{K_{eff}} = \rho = 0,1 . \frac{0,1}{2,5} = 4.10^{-3}$$

ومنه يحسب الدور المستقر :

$$T = \frac{\beta - \rho}{\lambda . \rho} = \frac{0,0075 - 0,004}{0,08 . 0,004} \text{ sec}$$

$$T = 10,9 \text{ sec}$$

ملحق /٢/
التحكم بالمفاعلات النووية

1 ـ تأثير النيترونات المتأخرة :

رأينا سابقاً أنه لدى الانشطار النووي تنشأ أولاً النيترونات الفورية ومن ثم ينشأ بعد زمن قصير جزءُ β من النيترونات ، تسمى النيترونات المتأخرة التي تلعب دوراً هاماً في التحكم بالمفاعلات .

ان ظهور هذه النيترونات ينجم عن بعض نتاجات أنشطار اليورانيوم مثل البور 87 واليود 137 التي هي بمثابة نظائر نشأت عن التفكك الاشعاعي . في الجدول التالي العائد لست زمر من النيترونات المتأخرة التي تنجم عن انشطار اليورانيوم 235 نجد قيم $\beta_i(i=1,2,\ldots,6)$ وقيم ثوابت التفكك λ_i للنوى السوابق ثم أزمنة التأخير $t_i=\frac{1}{\lambda_i}$ التي هي أزمنة حياة هذه السوابق .

ينجم اجمالياً عدد من النيترونات المتأخرة $\beta=\Sigma_i\beta_i = 6{,}417.10^3$. على الرغم من صغر عدد هذه النيترونات نسبة لجميع نيترونات الانشطار فانها تكتسب معنى كبيراً في التصرف الزمني للمفاعل .

بسبب كبر أزمنة الحياة t_i للنوى السوابق تجاه زمن حياة النيترونات النووية ، نُعرِّف زمن حياة وسطي للنيترونات المتأخرة يعطى بالعلاقة :

i	$\beta i\%o$	$\lambda_i[s^{-1}]$	$t_i[s]$
1	0,212	0,012	83,4
2	1,406	0,030	33,3
3	1,258	0,111	9,00
4	2,536	0,301	3.32
5	0,738	1,136	0.881
6	0,267	3,013	0,332

$$\overline{\ell} = (1-\beta).\ell + \Sigma_i\beta_i.t_i$$

ℓ : هو زمن حياة النيترونات الفورية .

وفقاً للقيم الكائنة في الجدول السابق لدينا :

$\Sigma_i\beta_i t_i=0,085$ sec . هذا المقدار هو دوماً كبير تجاه زمن حياة النيترونات الفورية ℓ . لذا فان دور المفاعل يحدَّد من قبل النيترونات المتأخرة . لدينا بالتقريب :

$$T = \frac{\overline{\ell}}{K-1} = \frac{0,086}{K-1}$$

في حال $K=0,01$ فان $T=86$ sec . هذا يعني أن تغير المحتوى النيتروني يجري نسبياً ببطء مما يساعد على مراقبة المفاعل والتحكم به .

2 ـ المعادلات الحركية :

لتمثيل التصرف الزمني للمفاعل لدى اعتبار النيترونات المتأخرة يجب وضع المعادلات الحركية للمفاعل . عندئذ نشير الى كثافة نيترونات السوابق العائدة الى الزمرة i بـ C_i .

ان تمثيل هذه السوابق وتفككها الاشعاعي يجرى بوساطة المعادلات التفاضلية التالية :

$$i=1,\ldots,6 \; ; \quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{K\beta_i n(t)}{\ell} - \lambda_i C_i \qquad (1)$$

ان مقادير التفكك $\lambda_i C_i$ تظهر بمثابة منابع في الموازنة النيترونية . في حالة منبع نيتروني $S(t)$ $[n.cm^{-3}s^{-1}]$ ، فان معادلة الموازنة النيترونية الكاملة هي :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{K(1-\beta)-1}{\ell} \; n(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i \; C_i + S(t) \qquad (2)$$

يسمى المقدار $K_p=K(1-\beta)$ عامل التكاثر الفوري .

ان المعادلتين (1) و(2) تقدمان من أجل ست زمر من النيترونات جملةً من سبع معادلات تفاضلية يمكن حلها لدى معرفة الشروط الابتدائية .

في الحالة العامة فان عامل التكاثر K هو أيضاً تابع للزمن ، وعندئذ فان جملة هذه المعادلات هي غير خطية .

3 ـ تابع التحويل للمفاعل :

نعالج موضوع تابع التحويل في حالة انزياح صغير للمفاعل في حالته المتوازنة $(K=1)$. نستطيع من أجل K أن نكتب :

$$K = 1+\delta K \; ; \; \delta K \ll 1 \qquad (3)$$

ومن أجل الكثافة النيترونية n وكثافة السوابق $C_i(t)$ نكتب المعادلات التالية :

$$n(t) = n_0 + \delta n(t) \; ; \; \delta n(t) \ll n_0 \qquad (4)$$

$$C_i(t) = C_{i0}+\delta C_i(t) \; ; \; \delta C_i(t) \ll C_{i0} \qquad (5)$$

عند $t=0$ لدينا : $n=n_0, C_i=C_{i0}$ و $K=1$.

اذن من المعادلة (1) نحصل على :

$$C_{i0} = \frac{\beta_i . n_0}{\ell . \lambda_i}$$

لأن :

$$\frac{d}{dt} = 0$$

أو :

$$\lambda_i C_{i0} = \beta_i n_0 / \ell \qquad (6)$$

$$\Sigma \lambda_i C_{i0} = \Sigma_i \ \beta_i \ \frac{n_0}{\ell} = \frac{\beta n_0}{\ell} \qquad (7)$$

نعوض المعادلات (3) ، (4) و (5) في المعادلة (1) فنحصل على :

$$\frac{d}{dt}(C_{i0}+\delta C_i) = (1+\delta K)n_0+\delta n) \ \frac{\beta_i}{\ell} - \lambda_i \ (C_{i0}+\delta C_i) \qquad (8)$$

$$= \frac{\beta_i}{\ell} \ [n_0+\delta n + n_0\delta K + \delta K.\delta n] - \lambda_i \ (C_{i0}+\delta C_i)$$

$\delta n.\delta k$ قيمة صغيرة جداً مهملة وأيضاً $n_0\beta_i\delta k$ بالإضافة الى أن :

$$\lambda_i C_{i0} = \frac{\beta_i n_0}{\ell} \ , \ \frac{d}{dt} C_{i0} = 0$$

يبقى من المعادلة (8) ما يلي :

$$\frac{d(\delta C_i)}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} \ \delta_n - \lambda_i \delta C_i \qquad (9)$$

نستخرج من المعادلة (1) $\lambda_i C_i$ ونعوض في المعادلة (2) فنحصل على :

$$\frac{d}{dt} n(t) = \frac{K-1-\beta}{\ell} \ n(t) + \Sigma_i \left(\frac{\beta_i}{\ell} \ n(t) - \frac{d}{dt} \ C_i \right)$$

$$= \left(\frac{K-1}{\ell} - \frac{\Sigma\beta_i}{\ell} \right) n(t) + \Sigma_i \frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \frac{d}{dt} \Sigma_i C_i$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(K-1)n(t)}{\ell} - \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^{6} C_i(t).n(t) + S(t)$$

نفرض المنبع الخارجي مساوياً للصفر ، أي غير موجود . المعادلة السابقة تصبح :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(K-1)n}{\ell} - \sum_{i=1}^{6} \frac{d}{dt} C_i(t) \tag{10}$$

نعوض المعادلات (3) ، (4) و (5) في المعادلة (10) نحصل على :

$$\frac{d}{dt} (n_0+\delta n) = \frac{(1+\delta K-1)\ (n_0+\delta n)}{\ell} - \sum_{i=1}^{6} \frac{d}{dt} (C_{i0}+\delta C_i)$$

أي :

$$\frac{d(\delta n)}{dt} = \frac{\delta K}{\ell} (n_0+\delta n) - \sum_{i=1}^{6} \frac{d}{dt} \delta C_i$$

ولكن $\delta n.\delta K$ قيمة صغيرة جداً مهملة والمعادلة التفاضلية تصبح :

$$\frac{d}{dt}\delta n = \frac{\delta K}{\ell} n_0 - \sum_{i=1}^{6} \frac{d}{dt}\delta C_i \tag{11}$$

ننقل المعادلتين (9) و (11) الى المستوى اللابلاسي فيكون :

$$s\widetilde{\delta C_i} = \frac{\beta_i}{\ell} \widetilde{\delta n} - \lambda_i \widetilde{\delta C_i}$$

أو :

$$\delta C_i(s+\lambda_i) = \frac{\beta_i}{\ell} \widetilde{\delta n} \tag{12}$$

$$s\delta n = \frac{n_0}{\ell} \widetilde{\delta K} - \sum_{i=1}^{6} s\widetilde{\delta C_i}(t) \tag{13}$$

نعوض في (13) عن $\widetilde{\delta C_i}$ بقيمتها مأخوذة من (12) .

$$\delta n.s \left[1+\sum_{i=1}^{6} \frac{\beta_i}{\ell} \cdot \frac{1}{s+\lambda_i}\right]$$

ان الاشارة ~ الواردة على القيم السابقة تعني أن هذه القيم أصبحت في مستوى لابلاس .

لدينا مما سبق :

$$G_0(s) \neq \frac{\widetilde{\delta n}}{n_0 \delta K} = \frac{1}{s(\ell+\Sigma_i \frac{\beta_i}{s+\lambda_i})} \qquad (14)$$

$$\widetilde{\delta K} \longrightarrow \boxed{G_0(s)} \longrightarrow \frac{\widetilde{\delta n}}{n_0}$$

الشكل (1)

المعادلة (14) هي تابع التحويل للمفاعل ضمن شروط التقريب التي رأينا .

من أجل $s = j\omega$ لدينا :

$$G_0(j\omega) = \frac{1}{j\omega(\ell+\Sigma_i \frac{\beta_i}{j\omega+\lambda_i})} \qquad (15)$$

نستطيع أن نميز ثلاثة مجالات :

آ ـ في حالة ترددات صغيرة جداً $\omega \ll \lambda_i$ فان التابع $G_0(j\omega)$ يحدَّد فقط من قبل الوسائط β_i و λ_i . في الواقع لدينا :

$$G_0(j\omega) = \frac{1}{j\omega(\ell+\Sigma_i \frac{\beta_i}{\lambda_i})} \simeq \frac{1}{j\omega\ell} \qquad (16)$$

ان ثابتة الزمن $\bar{\ell}$ الفعالة والمثقّلة على جميع النيترونات الفورية والمتأخرة لا تتعلق تقريباً بزمن حياة النيترونات الفورية . في الواقع من أجل اليورانيوم ـ 235 . لدينا :

$$0{,}085=\Sigma\beta_i t_i = \Sigma\beta \frac{1}{\lambda_i} \quad \text{ثانية}$$

بينما $\ell \leqslant 10^{-3}$ ثانية .

لدينا : $0{,}085 \approx \bar{\ell} = \ell+\Sigma_i \beta_i/\lambda_i$ ثانية .

عندما تنتهي ω الى الصفر $(\omega\rightarrow 0)$ فان $G_0(j\omega)\rightarrow\infty$ هذا يعني أن $\delta n\rightarrow\infty$ ، أي أن الكثافة النيترونية تكبر دون حدود والمفاعل يصبح غير مستقر إذا ما اعتبرنا مفعول النيترونات فقط دون الأخذ بعين الاعتبار مفعول درجات الحرارة وفقاعات البخار وتأثير الكسنون .

ب ـ في مجال الترددات العالية $(\omega \gg \lambda_i)$ و $\omega \gg \frac{\beta}{\ell}$

لدينا :

$$G_0(j\omega) \cong \frac{1}{j\omega(\ell+\Sigma_i \beta_i/j\omega)}$$

$$\simeq \frac{1}{j\omega\ell + \Sigma_i\beta_i} = \frac{1}{j\omega\ell+\beta}$$

$$\simeq \frac{1}{\ell(j\omega+\beta/\ell)} \qquad (17)$$

اذن من أجل $\omega \gg \frac{\beta}{\ell}$ لدينا :

$$G_0 \simeq \frac{1}{j\omega\ell} \qquad (18)$$

نرى أن $G_0(j\omega)\to 0$ بسرعة عند الترددات العالية لأن المفاعل لا يستطيع أن يتبع التغير السريع في التفاعلية اذ أن تابع التحويل السابق يتعلق فقط بزمن حياة النيترونات السريعة .

جـ - في المجال $\lambda_i \ll \omega \ll \beta/\ell$ فان التابع (17) يصبح :

$$G_0(j\omega) \simeq \frac{1}{\beta} = Cte$$

استقرار المفاعل النووي الحراري دون عاكس :

انطلاقاً من تبسيط معادلة بولتزمن التفاضلية من الرتبة الثانية التي تصف حركية المفاعل آخذين بعين الاعتبار مبدأ انتثار النيترونات ، نحصل على معادلات الحركة التفاضلية التالية العائدة كما هو مصطلح عليه الى المفاعل النقطي والى زمرة واحدة من النيترونات المتأخرة .

تؤخذ في هذه المعادلات قيمة وسطية لثابتة التفكك $\bar{\lambda}$.

$$\frac{d}{dt}(C+\delta C) = \frac{\beta}{\ell}(n_0+\delta n) - \bar{\lambda}(C_0+\delta C) \tag{19}$$

$$\frac{d}{dt}\delta C = \frac{\beta}{\ell}(n_0+\delta n) - \bar{\lambda}(C_0+\delta C) \tag{20}$$

$$\frac{dC_0}{dt} = 0 \rightarrow C_0 = \frac{\beta}{\ell.\bar{\lambda}} n_0$$

$$\frac{d}{dt}\delta C = \frac{\beta}{\ell}(n_0+\delta n) - \bar{\lambda}\left(\frac{\beta}{\ell.\bar{\lambda}} n_0 + \delta C\right) \tag{21}$$

$$= \frac{\beta}{\ell}(n_0+\delta n) - \frac{\beta}{\ell} n_0 - \bar{\lambda}\delta C$$

$$= \frac{\beta}{\ell} n_0 + \frac{\beta\delta n}{\ell} - \frac{\beta}{\ell} n_0 - \bar{\lambda}\delta C$$

$$\frac{d}{dt}\delta C = \frac{\beta}{\ell}\delta n - \bar{\lambda}\delta C \tag{22}$$

تنقل (22) الى مستوي لابلاس :

$$s\delta C = \frac{\beta}{\ell}\delta n - \bar{\lambda}\widetilde{\delta C} \tag{23}$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{K-1}{K} \cdot \frac{n}{\ell} - \frac{dC}{dt} \tag{24}$$

$$n = n_0 + \delta n \ ; \ C = C_0 + \delta C$$

$$\frac{d}{dt}(n_0+\delta n) = \frac{\delta K+1-1}{(\delta K+1)\ell}(n_0+\delta n) = \frac{d}{dt}(C_0+\delta C)$$

$$\frac{d}{dt}\delta n = \frac{\delta K . n_0}{(1+\delta K)\ell} - \frac{d}{dt}\delta C \ ; \ \delta n . \delta K \approx 0$$

بفرض أن : $1+\delta K \approx 1$ تكتب المعادلة السابقة :

$$\frac{d}{dt}\delta n = \frac{\delta K}{\ell} n_0 - \frac{d}{dt}\delta C$$

في مستوى لابلاس :

$$s.\widetilde{\delta n} = \frac{\delta K}{\ell} n_0 - s\widetilde{\delta C}$$

$$s.\widetilde{\delta n} = \frac{\delta K}{\ell} n_0 - s\left(\frac{\beta}{\ell} \cdot \frac{\widetilde{\delta n}}{s+\bar{\lambda}}\right)$$

$$s.\widetilde{\delta n}\left(1+\frac{\beta}{\ell} \cdot \frac{1}{s+\bar{\lambda}}\right) = \frac{\widetilde{\delta K}}{\ell} n_0$$

$$\frac{\widetilde{\delta n}}{n_0.\delta K} = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(\ell + \frac{\beta}{s+\overline{\lambda}})}$$

$$G_0(s) = \frac{\widetilde{\delta n}}{n_0.\delta K} = \frac{1}{s(\ell + \frac{\beta}{s+\overline{\lambda}})} \quad (25)$$

أو :

$$G_0(s) = \frac{s+\overline{\lambda}}{s[\ell(s+\overline{\lambda})+\beta]}$$

$$G_0(s) = \frac{s+\overline{\lambda}}{s[\ell(s+\overline{\lambda}+\frac{\beta}{\ell}]} \quad (26)$$

حيث : $\beta=0{,}0066,\ \ell=10^{-3}s,\ \overline{\lambda}=0{,}0785s^{-1}$

بما أن $\frac{\beta}{\ell}=6{,}6$ فإن $\overline{\lambda} \gg \frac{\beta}{\ell}$ ، تهمل بذلك $\overline{\lambda}$ تجاه المعادلة (26) . إذن :

$$G_0(s) = \frac{s+\overline{\lambda}}{s.\ell(s+\beta/\ell)} = \frac{\overline{\lambda}(1+s/\overline{\lambda})}{s.\ell\frac{\beta}{\ell}(1+\frac{s}{\beta/\ell})}$$

$$G_0(s) = \frac{\overline{\lambda}/\beta\ (1+s/\overline{\lambda})}{s(1+s/\beta/\ell)} \quad (27)$$

حساب التابع العابر أي حساب $\frac{\delta n(t)}{n_0}$ من أجل قفزة للتفاعلية $\widetilde{\delta K}/s$.

في الواقع :

$$\frac{\widetilde{\delta n}}{s.n_0} = \frac{\widetilde{\delta K}}{s} \cdot \frac{1/\ell(s+\overline{\lambda})}{s(s+\beta/\ell)}$$

أو :

$$H(s) = \frac{\widetilde{\delta n}}{s.n_0} = \left[\frac{\beta-\ell.\overline{\lambda}}{\beta^2.s} + \frac{\overline{\lambda}}{\beta s^2} - \frac{\beta-\ell.\overline{\lambda}}{\beta^2(s+\beta/\ell)} \right] \widetilde{\delta K}$$

بالانتقال الى مستوى الزمن لدينا :

$$\mathscr{L}^{-1} H(s) = h(t)$$

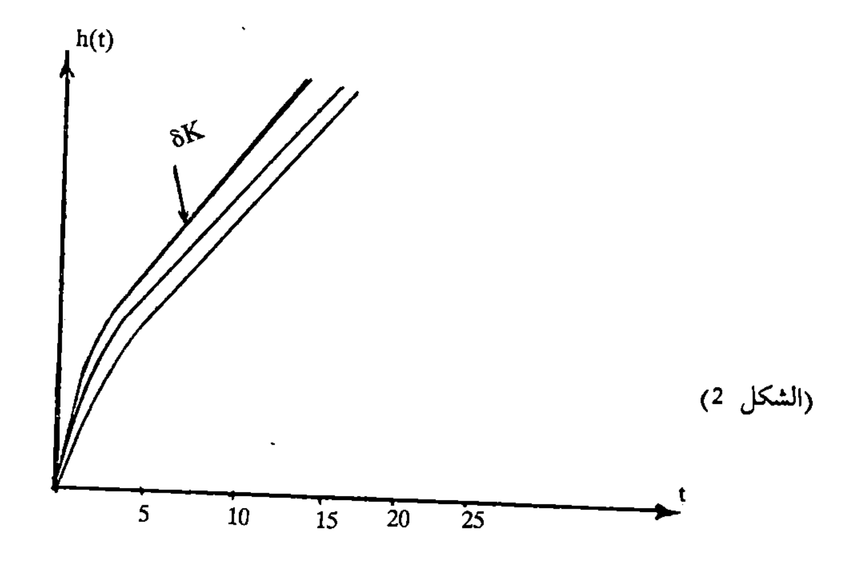
$$h(t)= \left[\frac{\beta-\ell\overline{\lambda}}{\beta^2} + \frac{\overline{\lambda}}{\beta}.t- \frac{\beta-\overline{\lambda}\ell}{\beta^2} e^{-(\beta/\ell).t} \right] \widetilde{\delta K} \tag{28}$$

أو :

$$h(t)= \frac{\delta n(t)}{n_0} = (150+12t-150\ e^{-6,6t})\,\delta K \tag{29}$$

من أجل القيم : $\delta K=55.10^{-4}$, $\delta K=6,4.10^{-4}$, $\delta K=7.10^{-3}$

لدينا منحنيات التابع العابر التالية : انظر الشكل (2) :



(الشكل 2)

استقرار الدارة المفتوحة (دون رد فعل خلفي) بطريقة نايكوست لدينا :

$$G_0(S) = \frac{\overline{\lambda}}{\beta} \quad \frac{1+s/\overline{\lambda}}{s(1+s/{}^{\beta}\!/\!_{\ell})}$$

أو :

$$G_0(j\omega) = \frac{\overline{\lambda}}{\beta} \quad \frac{1+j\omega/\overline{\lambda}}{s(1+j\omega/{}^{\beta}\!/\!_{\ell})} \qquad (30)$$

بتعويض $\overline{\lambda}$,β و ℓ بقيمها نحصل على :

$$G_0(j\omega) = \frac{12(1+12{,}73j\omega)}{j\omega(1+0{,}1515j\omega)} \qquad (31)$$

نضرب الصورة والمخرج بمرافق المخرج ونستخرج القيم الحقيقية والقيم التخيلية لـ $G_0(j\omega)$:

$$ReG_0 = \frac{158{,}3}{1+0{,}0023\ \omega^2}$$

$$ImG_0 = -\frac{12\ (1+2\omega^2)}{\omega\ (1+0{,}0023\omega^2)}$$

$$\underline{|{}^{\circ}G_0} = \text{arctg}\ 12{,}73\ \omega - \frac{\pi}{2}\ .\ \text{arctg}\ 0{,}1515\ \omega$$

$\omega=0 \rightarrow ReG_0=158{,}3 \leftarrow$ مستقيم مقارب

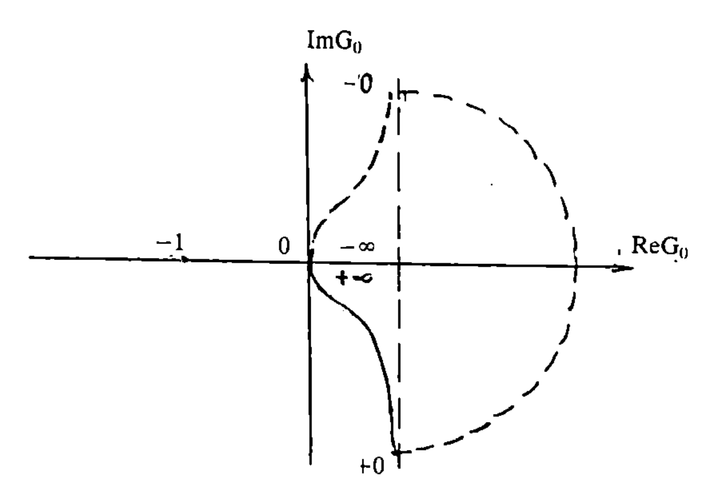
$$ImG_0 = -\infty$$

$$\underline{|G_0} = -\frac{\pi}{2}$$

$\omega=\infty \rightarrow ReG_0 = 0$

$$ImG_0 = 0$$

$$\underline{|G_0} = -\frac{\pi}{2}$$



الشكل (3)

يغلق منحني نايكوست على ذاته من π − بين 0 − و 0 + .

منحني نايكوست لا يدور حول (1 −) : اذن المفاعل مستقر بفعل النيترونات المتأخرة . انظر الشكل (3) .

دُرس استقرار المفاعل بموجب المعادلة (31) وبواسطة مخطط بود ومخطط فرق الصفحة . تشاهد النتائج في الشكل (4) حيث نجد أن هامش الطور يساوي تقريباً 90 درجة .

دراسة استقرار المفاعل مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير درجة الحرارة :

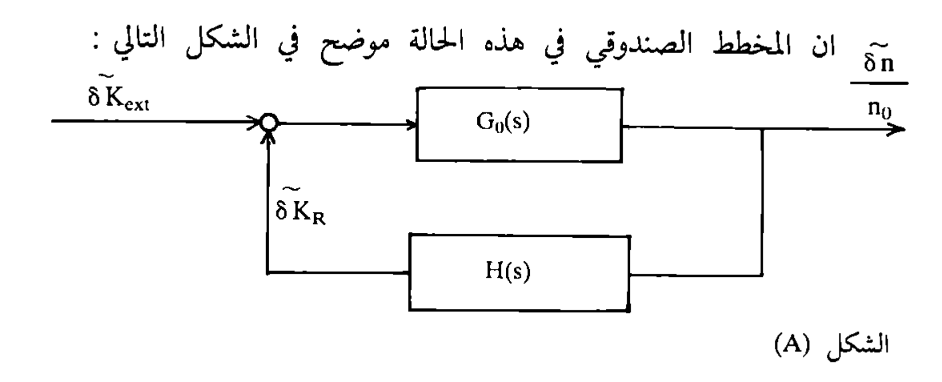
في حالة تغير الاستطاعة في المفاعل ، يتغير عامل التكاثر نتيجة تغير خارجي وتغير داخلي .

كرد فعل الحرارة في قلب المفاعل نستطيع أن نكتب :

$$\delta K = \delta K_{ext} + \delta K_R \tag{32}$$

حيث δK_{ext} تغير K الخارجي و δK_R تغير K الداخلي .

ان المخطط الصندوقي في هذه الحالة موضح في الشكل التالي :



الشكل (A)

G_0 هو تابع التحويل للمفاعل بينما $H(s)$ هو تابع التحويل الناتج عن فعل الحرارة في المفاعل .

ان تابع التحويل للدارة المغلقة كما هو معلوم هو :

$$G(s) = \frac{G_0(s)}{1+H(s).G_0(s)} \tag{33}$$

أما تابع التحويل $H(s)$ فيعطى بالعلاقة :

$$H(s)= \frac{\widetilde{\delta K_R}}{\widetilde{\delta n}/n_0} = \frac{\widetilde{\delta K_R}}{\delta T} \cdot \frac{\widetilde{\delta T}}{\widetilde{\delta n}/n_0} = \alpha \frac{\widetilde{\delta T}}{\widetilde{\delta n}/n_0} \tag{34}$$

δT هو تغير درجة الحرارة المطلقة في المفاعل المتجانس المعتبر و α هو عامل الحرارة ويساوي نسبة تغير التفاعلية الى تغير الحرارة من درجة واحدة . ان العلاقة بين الحرارة والاستطاعة (التي تتناسب مع الكثافة النيترونية) توصف عموماً من خلال معادلات نقل الحرارة . وفي أبسط الحالات فان الحرارة تتبع الاستطاعة بتأخير في الزمن من الدرجة الأولى وفقاً للعلاقة :

$$\tau \frac{d}{dt}\delta T = -\delta T + T_d . \frac{\delta n}{n_0} \tag{35}$$

حيث τ هو الزمن اللازم لبلوغ الحرارة المستقرة . T_d هي الحرارة النهائية المستقرة لدى افتراض كثافة نيترونية مضاعفة وشروط تبريد ثابتة (هذا هو افتراض

تقريبي) . من أجل تغير جيبي لـ δn لدينا في مستوي لابلاس واستناداً الى المعادلة السابقة :

$$\tau.s.\widetilde{\delta T} = -\widetilde{\delta T} + T_d \frac{\widetilde{\delta n}}{n_0}$$

$$\widetilde{\delta T}\,(\tau.s+1) = T_d. \frac{\widetilde{\delta n}}{n_0}$$

أو :

$$\frac{\widetilde{\delta T}}{\delta n}.n_0 = \frac{T_d}{1+\tau.s}$$

نضرب طرفي هذه المعادلة بـ α نحصل على :

$$\frac{\widetilde{\delta T}}{\widetilde{\delta n}}\, n_0.\alpha = \frac{\alpha T_d}{1+\tau s} = H(s) \qquad (36)$$

نضع $\alpha T_d = -a$ فنحصل على تابع التحويل لنقل الحرارة :

$$H(s) = -\frac{a}{1+\tau.s} \qquad (37)$$

من أجل $\alpha = -10^{-5}C°,\ T_d = 500°C,\ a = 5.10^{-3}$

نرسم مخططات بود وفروق الصفحة وذلك في حالة : $\tau = 0,2.s$ و $\ell = 10^{-3}$.

لدراسة استقرار الدارة المعطاة بالمخطط الصندوقي (A) يكفي أن ندرس الدارة المفتوحة .

بواسطة مخطط بود أو منحني نايكوست نستطيع أن نؤكد فيما اذا الدارة المغلقة أي المفاعل مع تأثير الحرارة مستقرة أم لا .

تابع التحويل للدارة المفتوحة هو :

$$B(s) = G_0(s)\ .\ H(s) \qquad (38)$$

استناداً الى (31) و (37) وبعد تعويض الثوابت بقيمها لدينا :

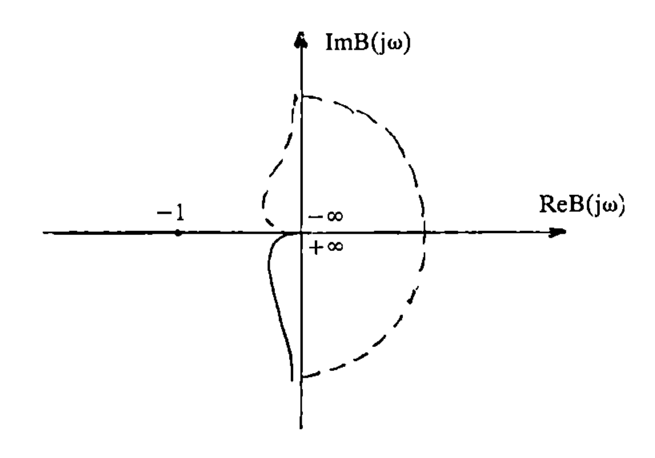
$$B(j\omega)= \frac{60.10^{-3}.(1+ j\omega/0,0785)}{j\omega(1+ j\omega/6,6).(1+ j\omega/5)} \qquad (39)$$

بما أن B(jω) له قطب s=0 فان منحني B(jω) يغلق على ذاته من π − بين (+ 0, − 0) .

$$\lim_{\omega\to 0} B(j\omega) = -\infty \rightarrow \underline{|B(j\omega)} = -90°$$

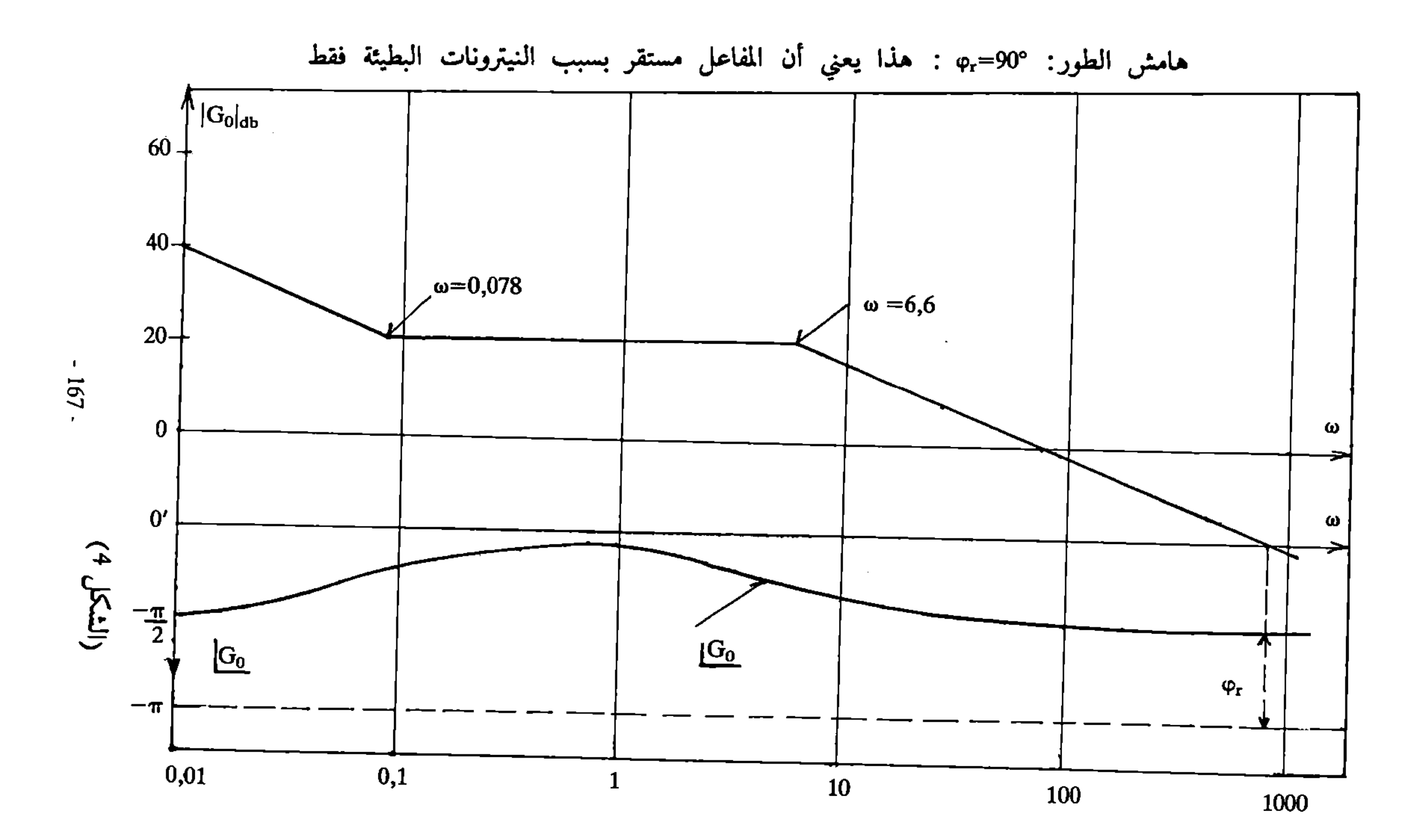
$$\lim_{\omega\to \infty} B(j\omega) = 0 = \qquad \underline{|B(j\omega)} = -180°$$

ان منحني نايكوست في الشكل (5) لا يدور حول (1 −) . اذن الدارة المغلقة أي المفاعل هو مستقر .



الشكل (5)

هامش الطور: $\varphi_r=90°$: هذا يعني أن المفاعل مستقر بسبب النيترونات البطيئة فقط



(الشكل 4)

ان مخطط بود ومنحني فرق الصفحة يدلان على أن المفاعل هو مستقر أيضاً ، إذ أن هامش الطور هو موجب ويساوي $84°$ أنظر الشكل (6) .

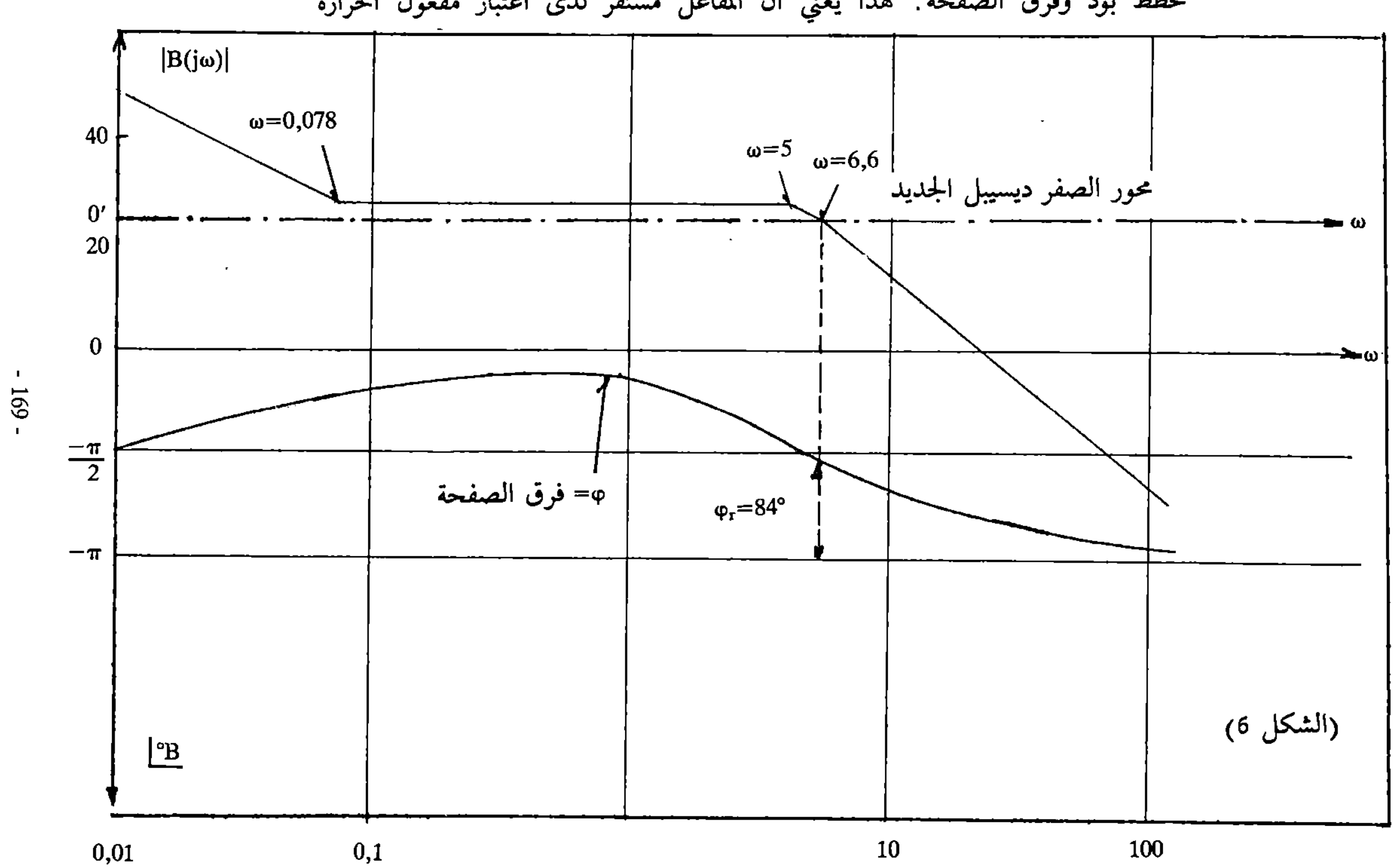
لقد أجريت دراسة استقرار المفاعل من أجل زمرة واحدة للنيترونات المتأخرة ومن أجل $\ell=10^{-3}$ و $\tau=0,2$. يشاهد في الشكل (7) منحنيات $|B(j\omega)|$ و $\underline{B}°$ من أجل $\ell=10^{-3}\,s$ و $\tau=0,25$ لقيم a :

$$a=0,\ 5.10^{-3},\ 10^{-2},\ 2.10^{-2}$$

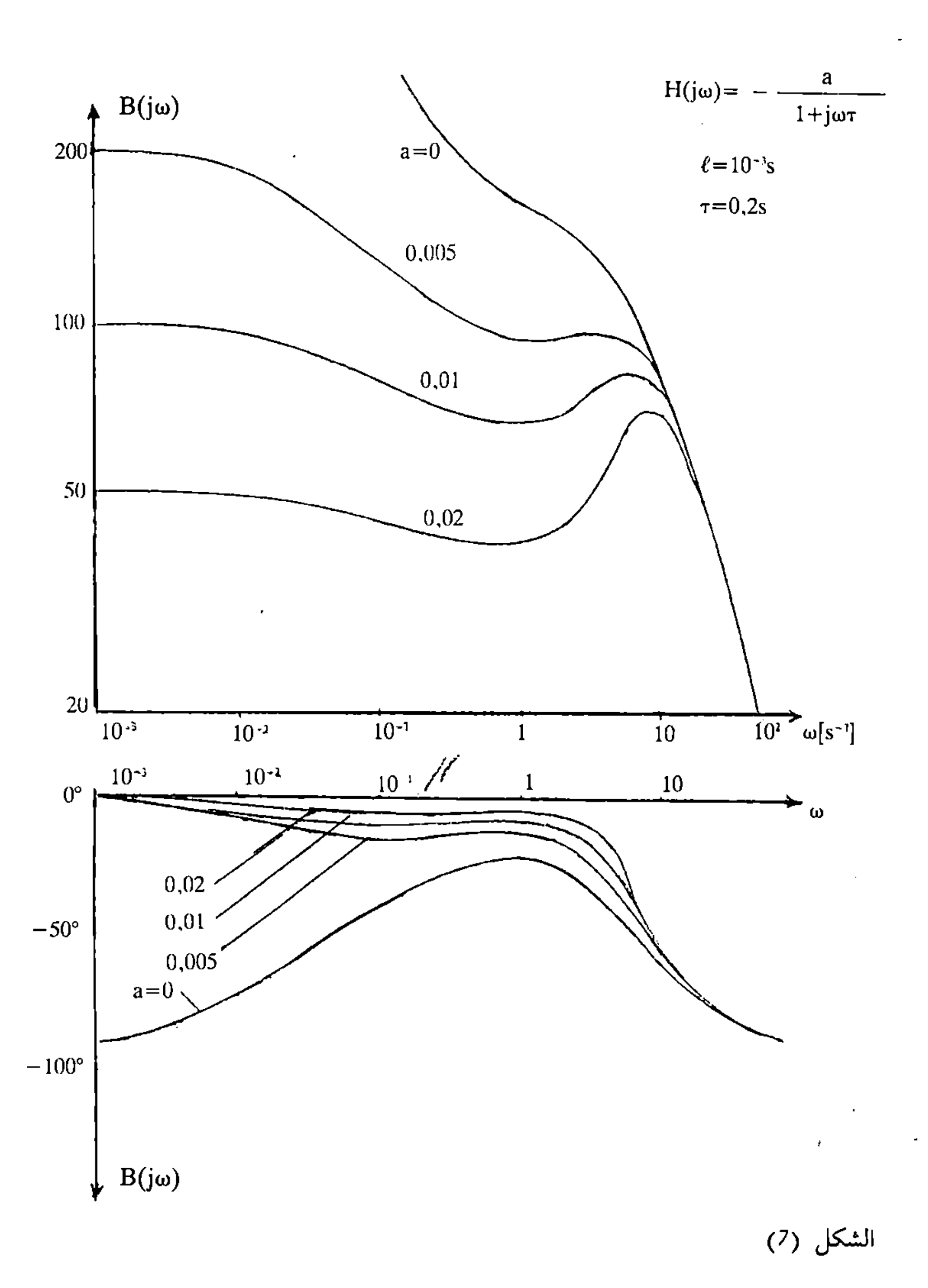
ويشاهد في الشكل (8) منحنيات $|B|$ و $\underline{B}°$ من أجل $\ell=10^{-3}$ و $\tau=2.s$ وقيم a ذاتها الواردة سابقاً .

هامش الطور $\varphi_e=84°$

مخطط بود وفرق الصفحة: هذا يعني ان المفاعل مستقر لدى اعتبار مفعول الحرارة

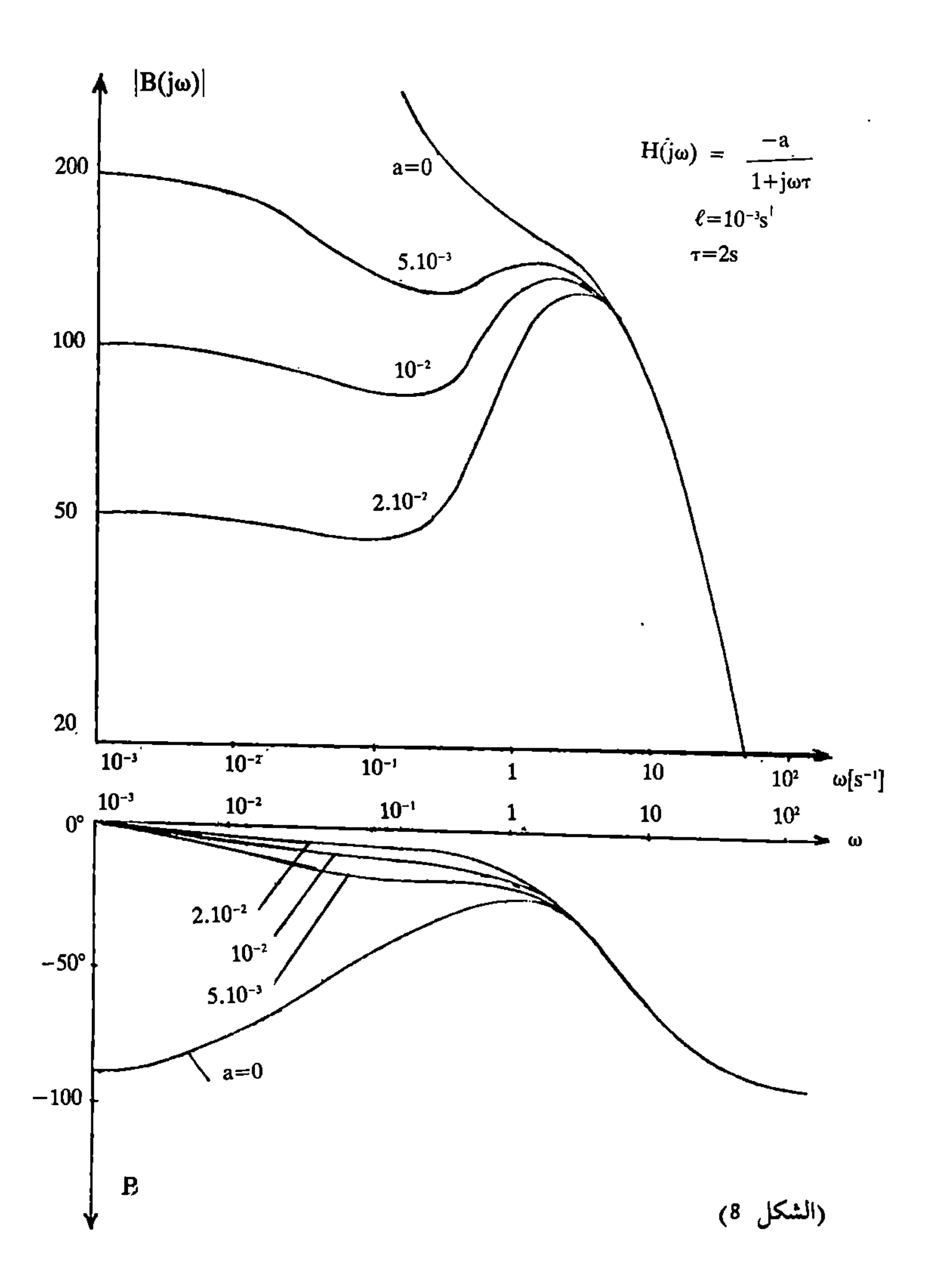


(الشكل 6)



B(jω)
$H(j\omega) = -\frac{a}{1+j\omega\tau}$
ℓ=10⁻³s
τ=0,2s
a=0
0,005
0,01
0,02
200
100
50
20
10⁻³
10⁻²
10⁻¹
1
10
10²
ω[s⁻¹]
0°
ω
0,02
0,01
0,005
a=0
−50°
−100°
B(jω)

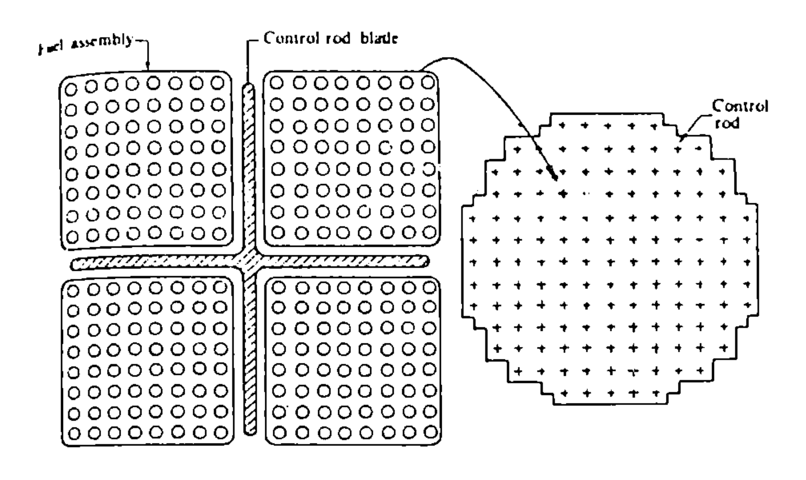
الشكل (7)


|B(jω)|
200
100
50
20
a=0
5.10⁻³
10⁻²
2.10⁻²
H(jω) = −a / 1+jωτ
ℓ=10⁻³s
τ=2s
10⁻³
10⁻²
10⁻¹
1
10
10²
ω[s⁻¹]
0°
−50°
−100
ω
2.10⁻²
10⁻²
5.10⁻³
a=0
B

(الشكل 8)

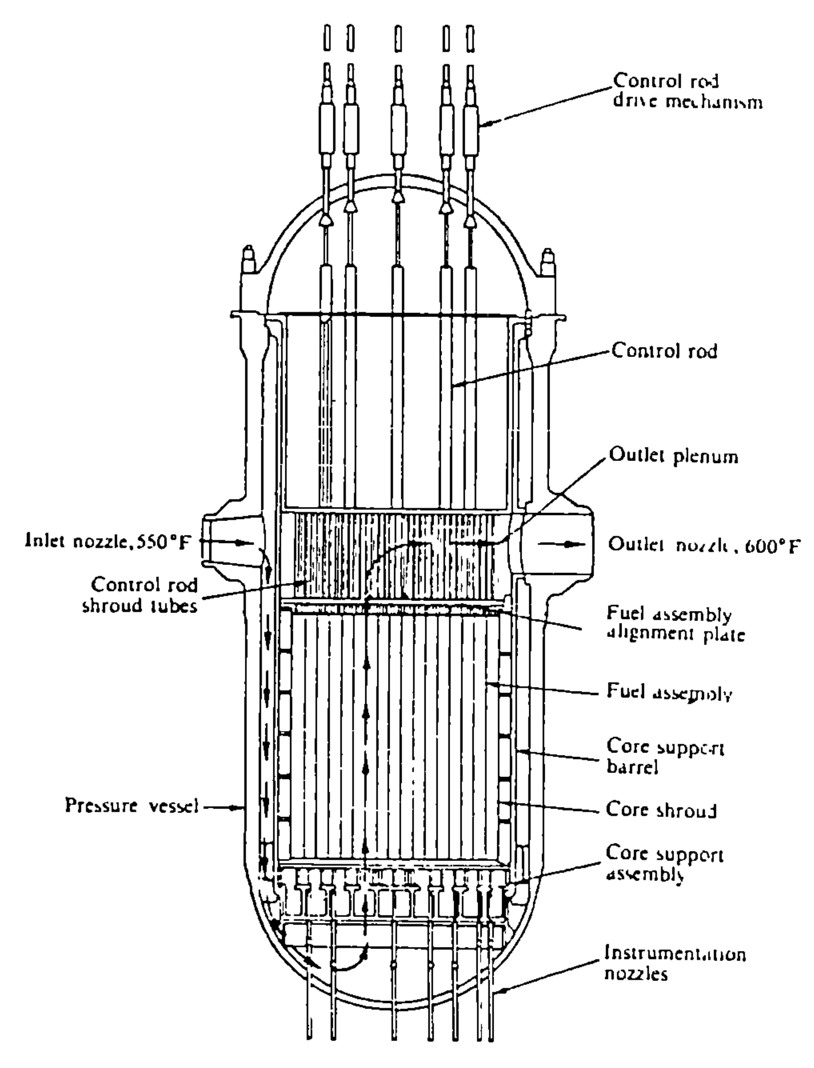
ملحق /٣/

تُشَاهَد في الصفحات التالية أهم مكونات المفاعلات



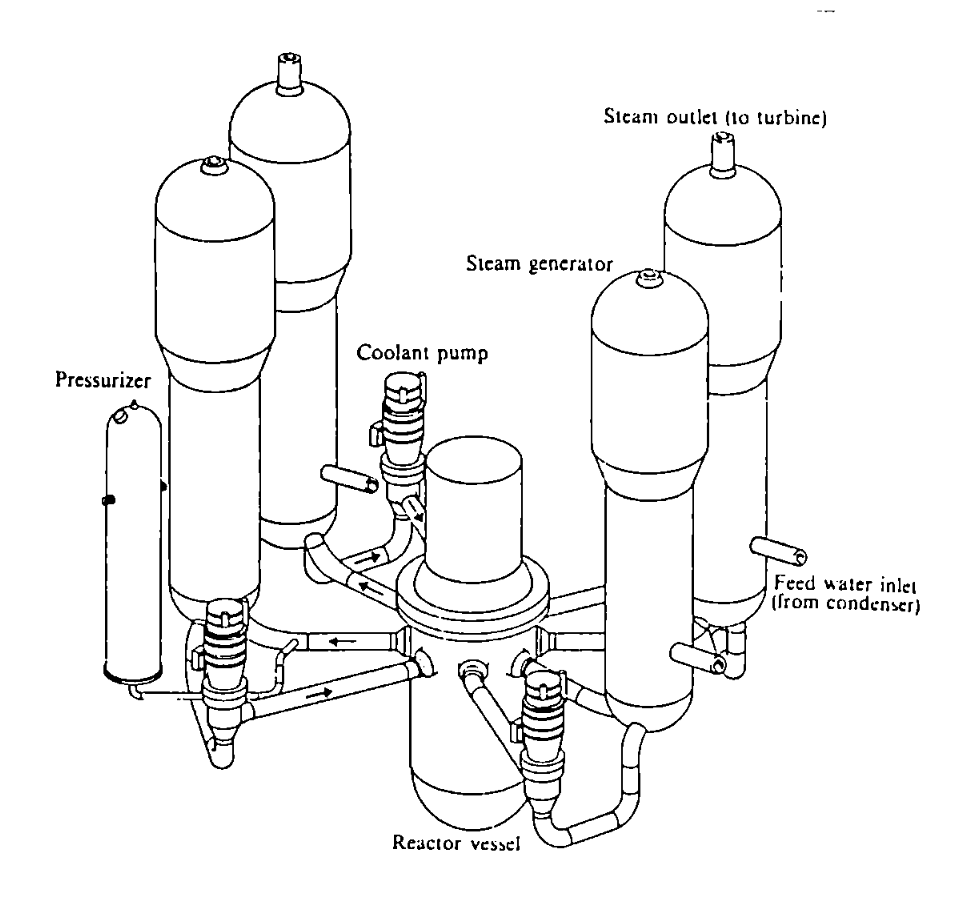
Cruciform rod in place between four fuel assemblies and the complete array of rods for a BWR core. (Courtesy General Electric Company.)

الشكل (1) الشكل المتصالب لقضيب التحكم



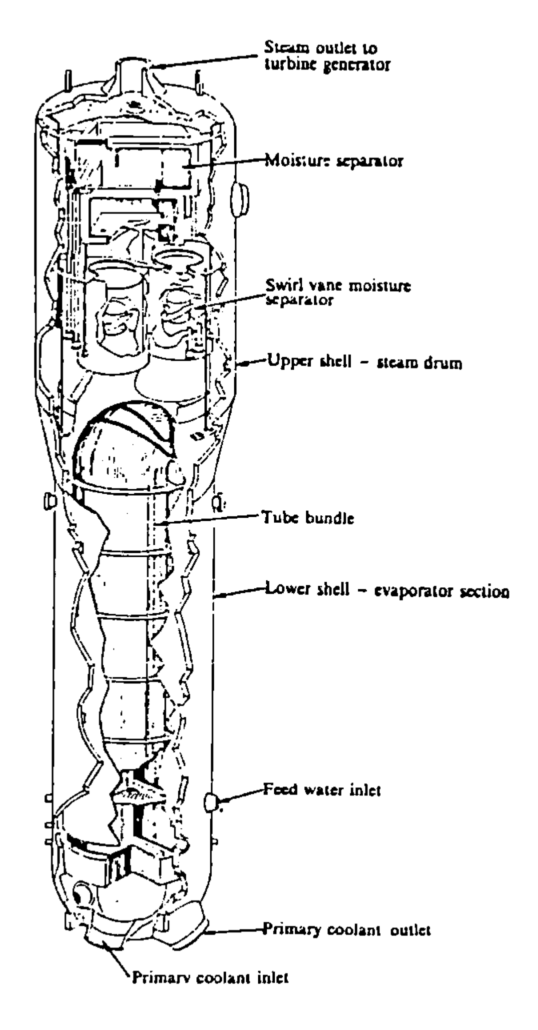
Cross-sectional view of a pressurized-water reactor.
(Courtesy Combustion Engineering, Inc)

الشكل (2) مقطع عرضاني لمفاعل الماء المصعوط



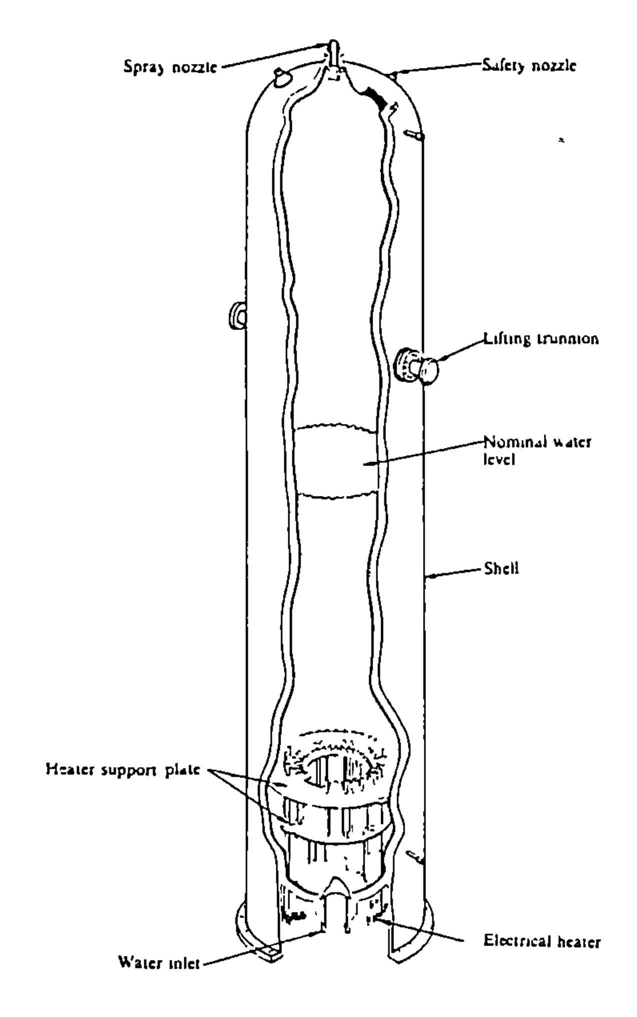
Schematic arrangement of the major components of a PWR steam supply system.

الشكل (3) ترتيب لأهم مكونات نظام المفاعل PWR



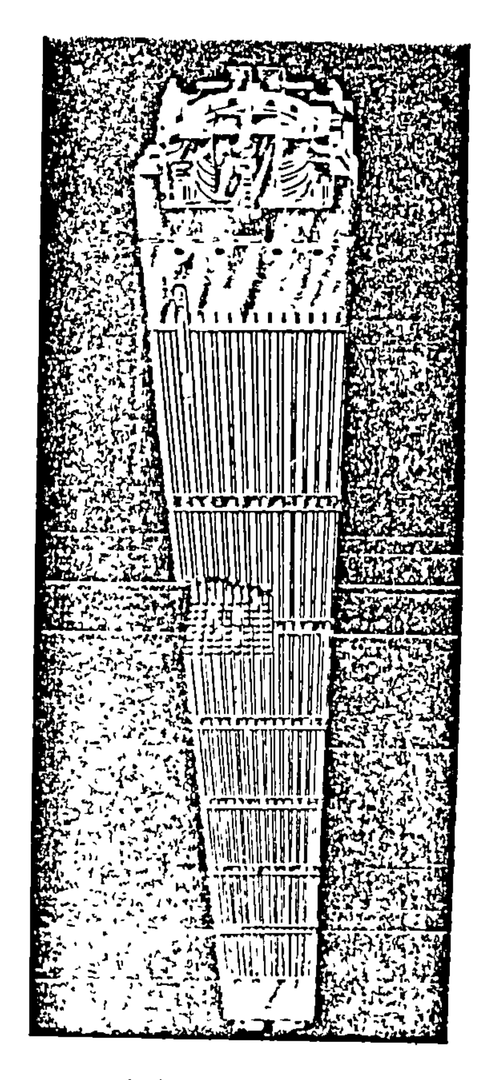
A PWR steam generator. (Courtesy Westinghouse Electric Corporation.)

الشكل (4) مولد البخار للمفاعل PWR



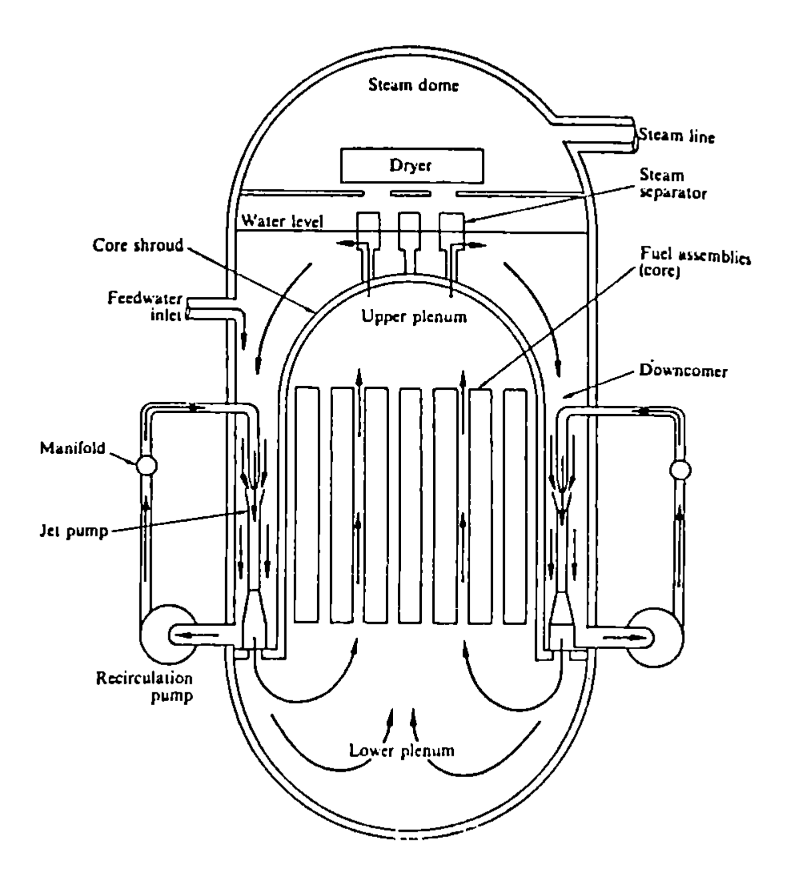
A PWR pressurizer (Courtesy Westinghouse Electric Corporation)

الشكل (5) جهاز الضغط للمفاعل PWR



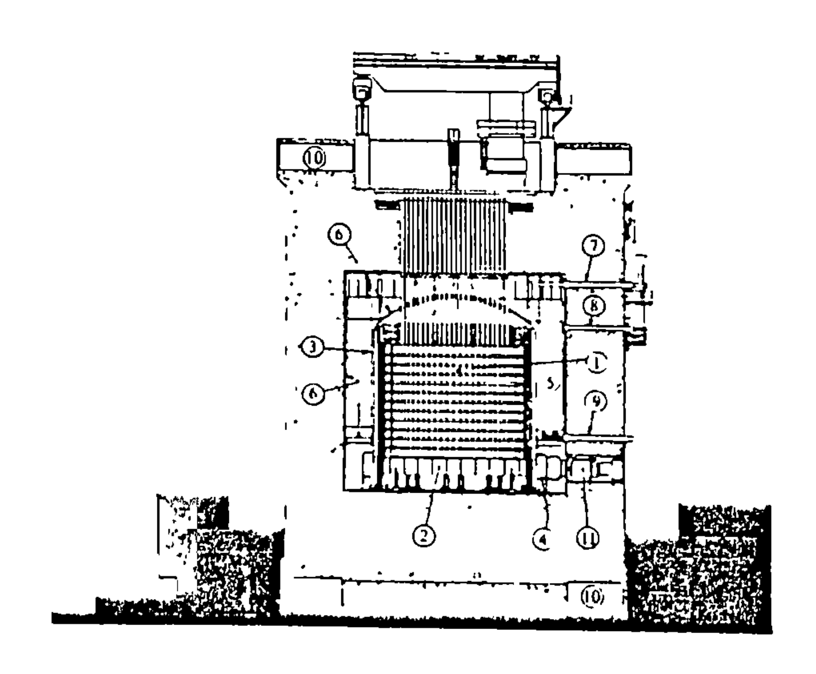
Fuel assembly for a PWR (Courtesy Babcock & Wilcox Company)

التشكل (6) حملة الوقود للمفاعل PWR



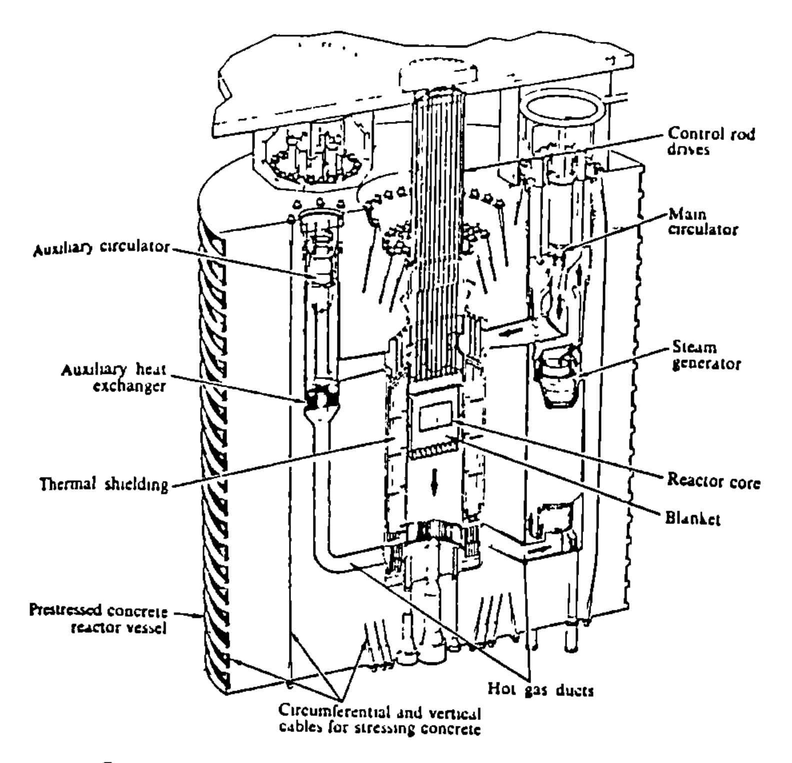
Cross-sectional view of a boiling-water reactor. The motion of the water is shown by arrows. (Courtesy General Electric Company.)

الشكل (7) مقطع عرضاني لمفاعل الماء المغلي



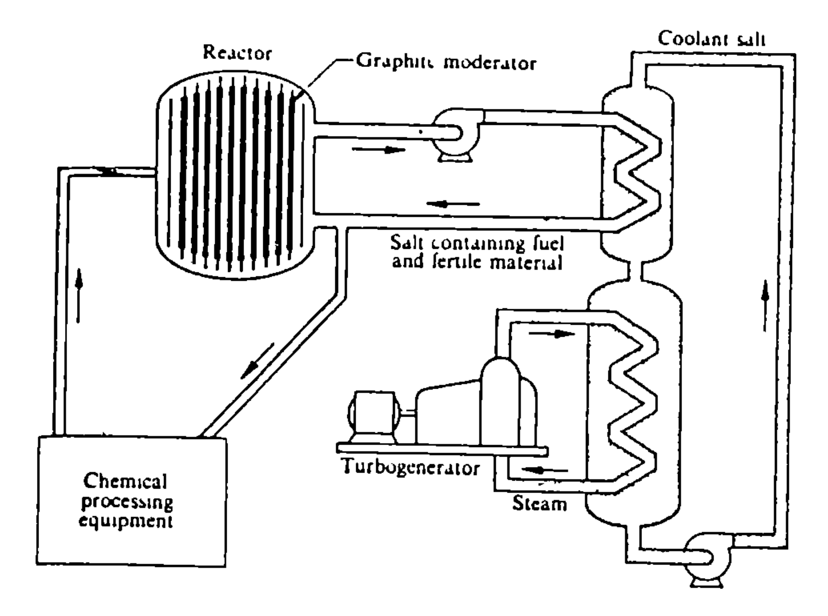
The Hinkley Point B advanced gas reactor: (1) reactor core, (2) supporting grid, (3) gas baffle, (4) circulator outlet gas duct, (5) steam generator, (6) thermal insulation, (7, 8) steam duct penetrations, (9) steam generator feed water inlet penetrations, (10) gallery for access to cable stressing concrete reactor vessel, (11) gas circulators (Courtesy the Nuclear Power Group, Limited)

الشكل (8) مفاعل الغاز المتقدم



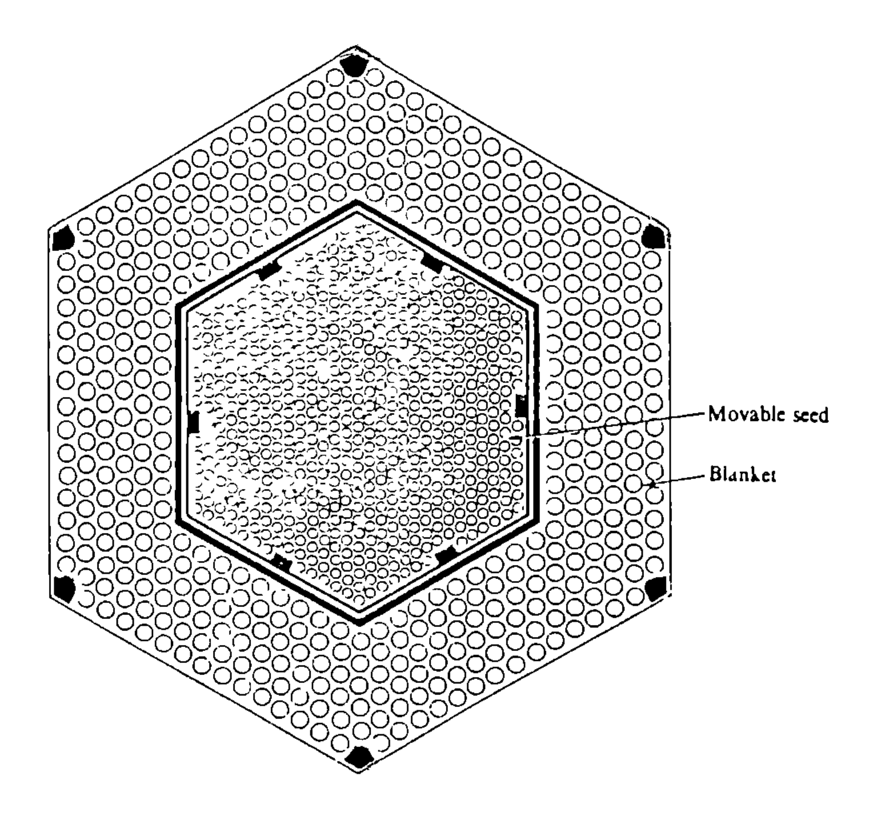
Cross section through a gas cooled fast reactor (Courtesy Gulf General Atomic Company)

الشكل (9) المقطع الطولاني لمفاعل سريع مبرد بالغاز



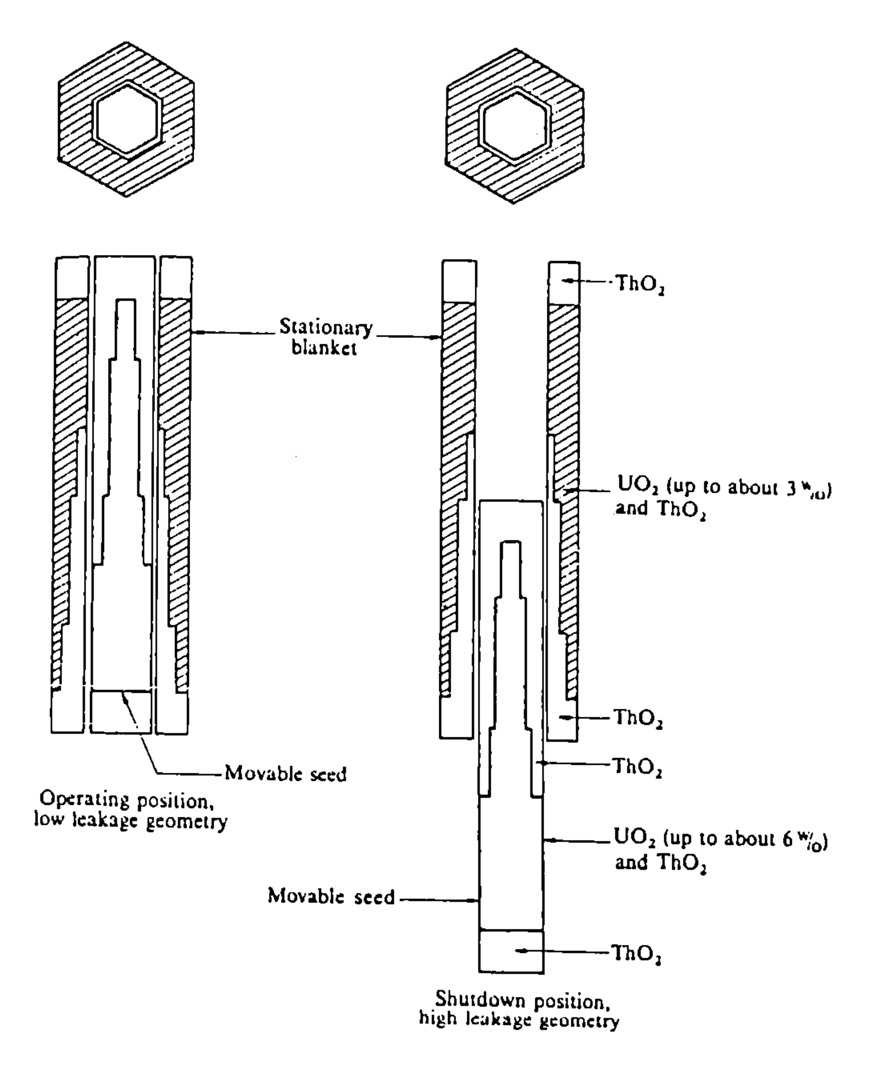
Schematic drawing of a molten salt breeder reactor (Courtesy Oak Ridge National Laboratory)

الشكل (15) مخطط لمفاعل التوالد المبرد بالملح الذائب



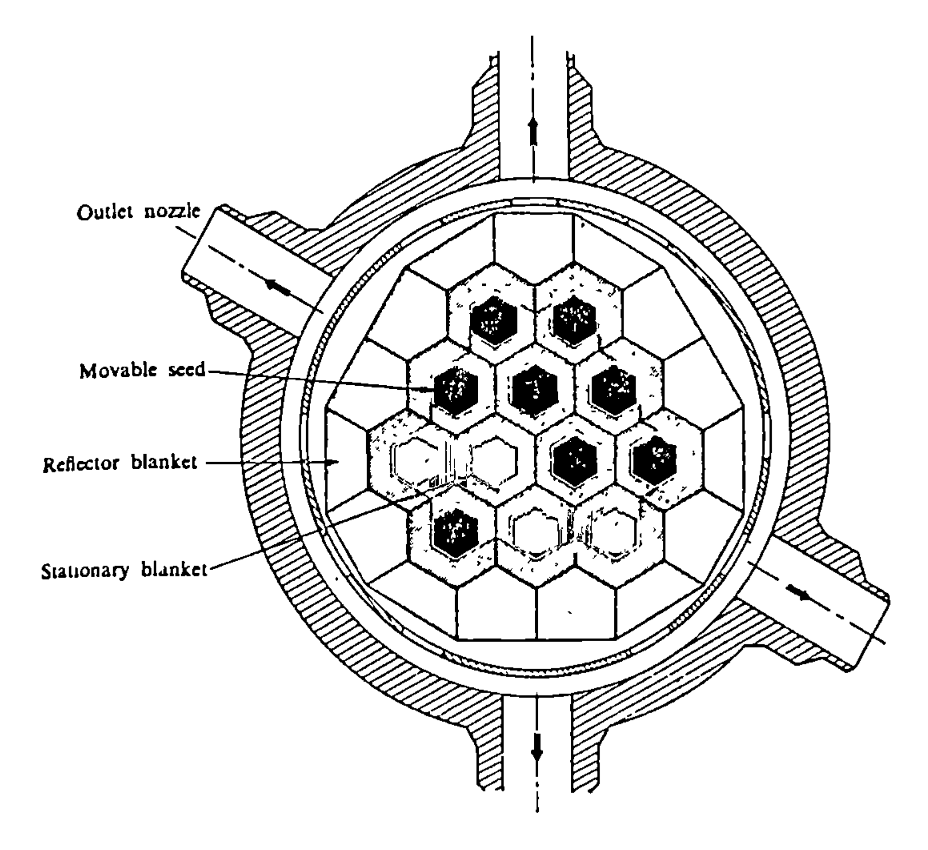
Typical LWBR fuel module cross section (Courtesy USAEC)

الشكل (11) مقطع عرضاني لترتيب الوقود في المفاعل LWBR



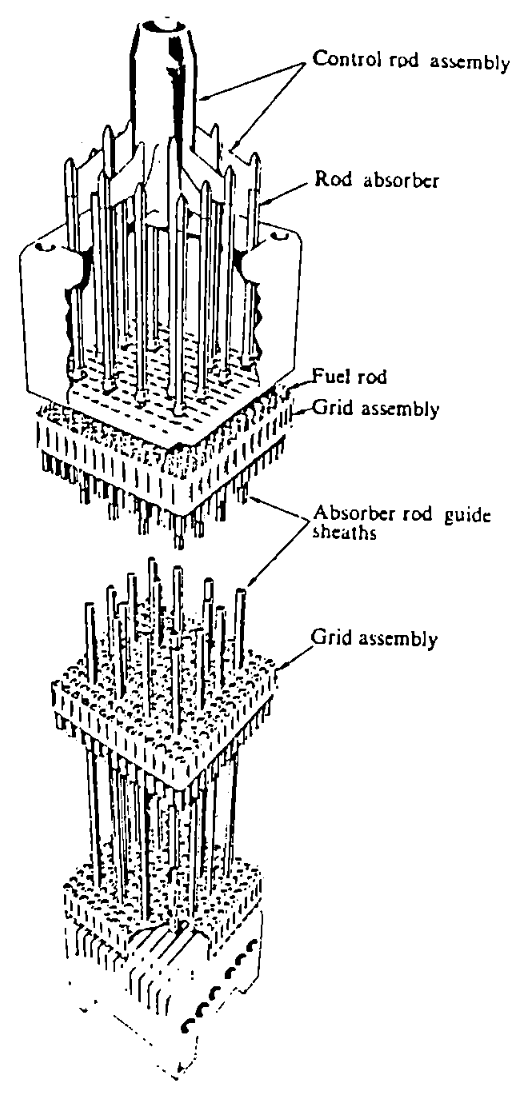
Variable geometry control concept. (Courtesy USAEC.)

الشكل (12) طريقة تحكم ذات هندسة متغيرة



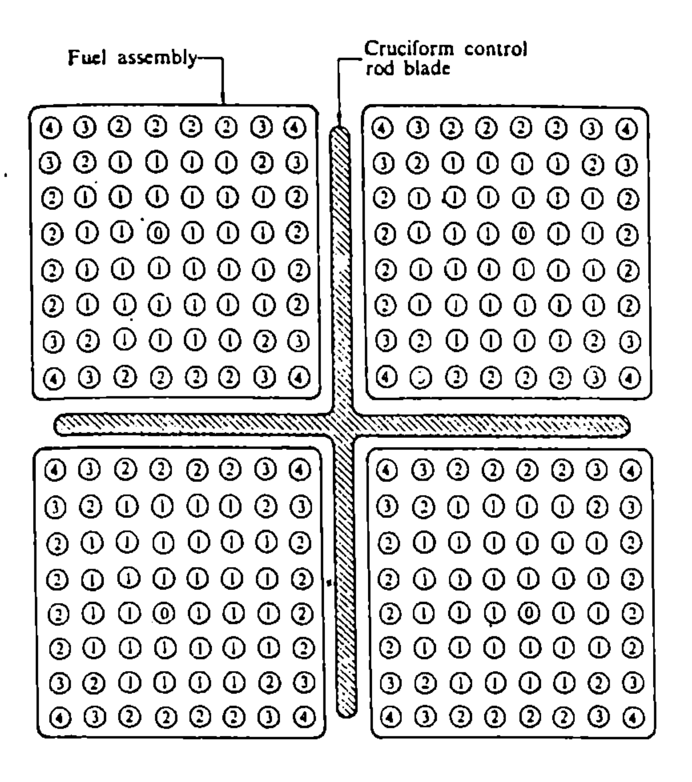
LWBR core cross section. (Courtesy USAEC.)

الشكل (13) المقطع العرصاني للمماعل LWBR



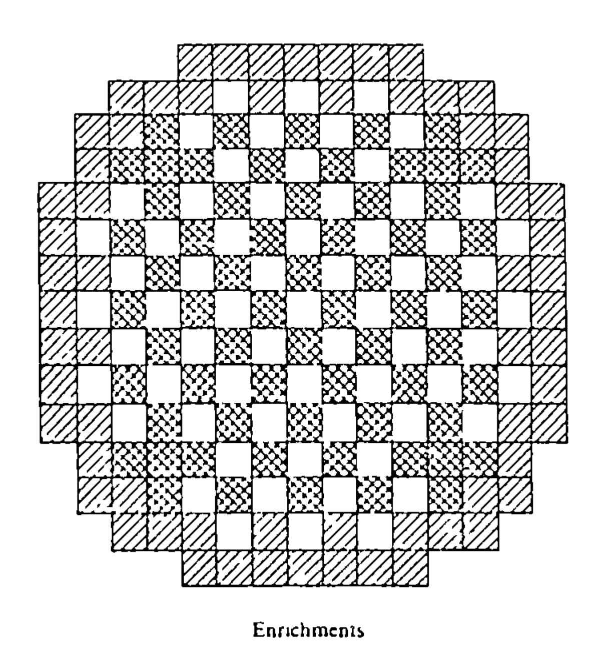
A cluster control rod assembly.
(Courtesy Westinghouse Electric Corporation.)

الشكل (14) جملة قضبان التحكم



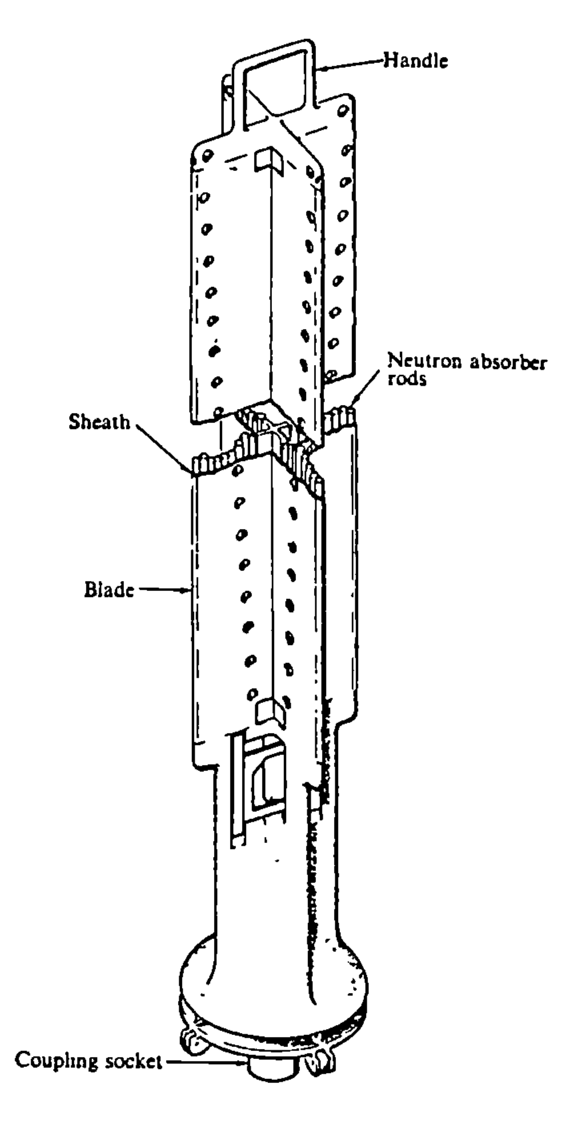
Fuel loading pattern within fuel assemblies of a BWR. (Courtesy General Electric Company.)

الشكل (15) نموذج تعبئة في المفاعل BWR



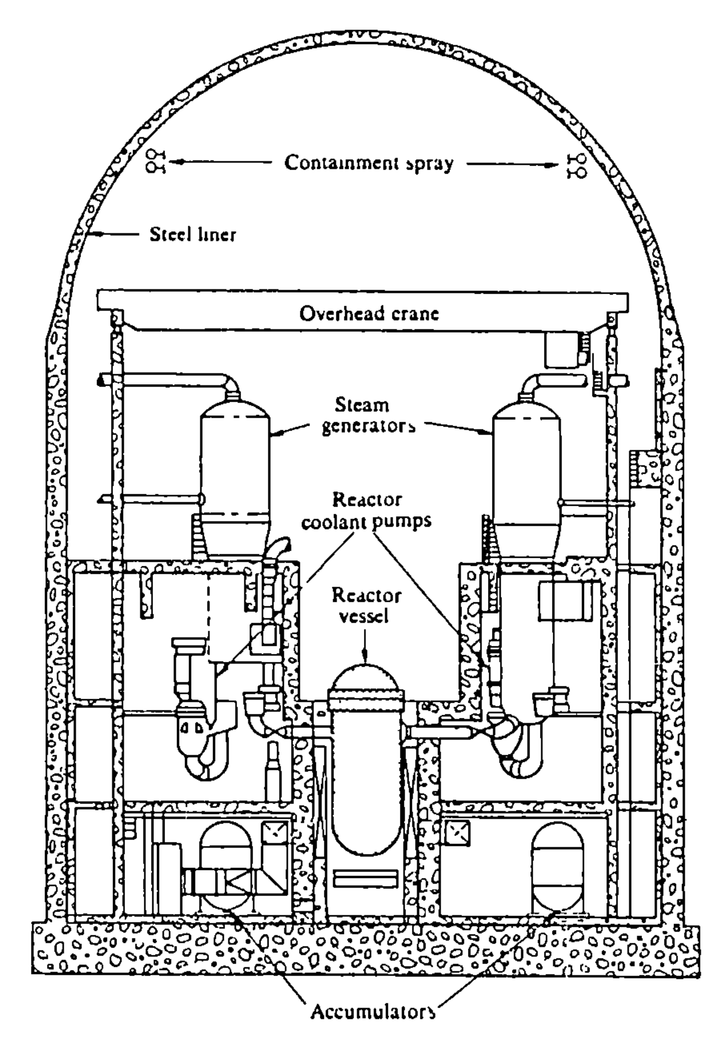
Fuel loading pattern at the beginning of life of a PWR (Courtesy Westinghouse Electric Corporation.)

الشكل (16) نموذج تعبئة في بداية حياة المفاعل PWR



A cruciform control rod. (Courtesy General Electric Company)

الشكل (17) قصيب تحكم متصالب



Typical PWR containment.

الشكل (18) حاوي نموذجي في المفاعل PWR

المراجع العلمية

1. Albert ZIEGLER; Lehrbuch der Reaktortechnik,
   Band 1 - Reaktortheorie
   Band 2 - Reaktortechnik
   Spring-Verlag, Berlin / Heidelberg / New York / Tokyo
2. S. GLASTONE und M.C. EDLUNG, Kernreakorthorie
3. Vorlesungen in der Schule fuer Kerntechink, Kernforschungszentrum, Karlsruhe.
4. Kurs-Unterlagen zum Fach Reaktorphysik, Band 1 und 2, Eidgenoessisches Institut fuer Reaktorforschung, 5303 Wuerenlingen/Schweiz
5. Physik und Technik der Kernreaktoren von Prof. Dr. Erich BAGGE, Kiel.
6. Nuclear Reactor for Research- The Geneva Series on the Peaceful Uses of Atomic Engery: Dr. J.G. BECKERLEY, General Editor.
7. MAYER-KUCKUK, Th.: Kernphysik, 3.Aufl. Stuttgart, Teubner 1979.
8. Kurs-Unterlagen zum Fach Kernphysik, Eidgenoessisches Institut fuer Reaktorforschung, 5303 Wuerenlingen, Schweiz.
9. FRAUENFELDER, H.; HENLEY, E.M.: Teilchen und Kerne, Muenchen, Wien, Oldenburg, 1979.
10. OLDEKOP, W.: Einfuehrung in die Kernreaktor- und Kernkraftwerkstechnik, Teil 1, 2; Muenchen: Thiemig 1975.
11. FASSBENDER, J.: Einfuehrung in die Reaktorphysik, Muenchen: Thiemig 1967.
12. SMIDT, D.: Reaktortechnik, Bd. 1; 2.Aufl., Karlsruhe: Braun 1976.
13. SCHRUEFER, E.: Strahlung und Strahlungsmesstechnik in Kernkraftwerken, Berlin: Elitera 1974.
14. Schpolski, E.W.: Atomphysik I,II; Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1979.

- المعجم الموحد لمصطلحات اللسانيات
المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم . تونس 1989 .
- المعجم الموحد /2/ لمصطلحات الفيزياء العامة والنووية 1989
المنظمة العربية للتربية والعلوم .
- معجم المصطلحات العلمية والتقنية في الطاقة الذرية
هيئة الطاقة الذرية - سورية 1986 .

المصطلحات العلمية

Line width	اتساع الخط الطيفي
Diffusion	انتشار
Penetration probability	احتمال النفاذ (الولوج)
Fermi-Dirac statistics	احصائيات ـ فيرمي وديراك
Height of potential barrier	ارتفاع حاجز الكمون
Pairs of particles	أزواج الجسيمات
Stability of nuclei	استقرار النوى
Polarisation of neutrons	استقطاب النيترونات
Radiative capture	الأسر الاشعاعي
Resonance capture	الأسر الرنيني
Cerenkov radiation	اشعاع شيرنكوف
Scattered radiation	اشعاع مبعثر
Alpha rays	أشعة ألفا
Gamma rays	أشعة غاما
Bremsstrahlung	أشعة الاكتباح

X-rays	الأشعة السينية
Radiactive decay	التفكك الاشعاعي
Compton recoil electrons	الكترونات كانتون المرتدة
Absorption	امتصاص
Emission	اصدار (انبعاث)
Fusion	الاندماج
Conversion	التبديل (التحول)
Delayed neutrons	النيترونات المتأخرة
Protons	البروتونات
Nuclide	النوكليد
Fission	الانشطار
Plasma	بلاسما
Emitter	باعث
Plutonium	بلوتونيوم
Positron	بوزيترون
Polonium	بولونيوم
flux	تدفق
Ray analysis	تحليل الأشعة
Internal Conversion	التحول الداخلي
Threshold frequency	تردد العتبة
Reactivity	تفاعلية
Triton	تريتون
Leakage	تسرب
Tritium	تريتيوم
Fission chain reaction	تفاعل انشطاري متسلسل
Nuclear reactions	تفاعلات نووية

Disintegration	تفكك
Scattering	تبعثر (انتشار)
Distribution	توزع
Decay constant	ثابتة التفكك
Plank constant	ثابتة بلانك
Gravitation	جاذبية
Particle	جسيم
Absorption edge	حد الامتصاص
Griticality of reactor	حرجية المفاعل
Critical	حرج
Magnetic properties	الخواص المغناطيسية
Cycle	دورة
Atom	ذرة
Nuclear Atom	ذرة نووية
Resonance	رنين
Critical angle	زاوية حرجة
Diffusion time	زمن الانتشار
Relaxation time	زمن الاسترخاء
Positron electron pair	زوج البوزيترون والالكترون
Charge	شحنة
Fission fragment	شظية انشطار
Intensity of radiation	شدة الاشعاع
Energy	طاقة
Energy of photo-electrons	طاقة الالكترونات الفتونية
Resonance energy	طاقة رنينية
Nuclear binding energy	طاقة الرباط النووي

Rest mass energy	طاقة كتلة السكون
Released energy	طاقة محررة
Spectrum	طيف
Avogadro number	عدد أفوغادرو
Quantum number	عدد الكموم
Neutron mumber	عدد النيترونات
Average life time	عمر متوسط
Half-life	عمر النصف
Factor	عامل
Reactor processes	عمليات المفاعل
Element	عنصر
Ionisation chamber	غرفة التأين
Potential difference	فرق الكمون
Annihilation	فناء
Photon	فوتون
Law of inertia	قانون العطالة
Coulmob's law	قانون كولون
Atomic bomb	قنبلة ذرية
Mass of electron	كتلة الألكترون
Gravitationa mass	كتلة التجاذب
Detection	كشف
Spin	فتل (اسبين)
Effect	مفعول
Compton effect	مفعول كانتون
Coefficient	معامل
Vector	متجهة

Operator	مؤثر
Range of alpha particles	مدى جسيمات ألفا
X-ray spectrometer	مطياف الأشعة السينية
Scattering coefficient	معامل التبعثر
Mass absorption coefficient	معامل الامتصاص
Multiplication coefficient	معامل التكاثر
Homogeneous	متجانس
Gross section	مقطع عرضاني
Breeder reactor	مفاعل التوالد
Rate of radiation	معدل الاشعاع
Mole	المول
Prompt neutrons	نيترونات فورية
Relativity	النسبية
Radius of electron	نصف قطر الألكترون
Fermi theory	نظرية فيرمي
Compound nucleus	نواة مركبة
Activity	نشاط
Nucleus	نوى
Nuclea model	نموذج نووي
Liquid drop model	نموذج قطرة السائل
Absorption cross section	مقطع الامتصاص العرضاني
Activation	تنشيط
Age of neutrons	عمر النيترونات
Alpha decay	تفكك ألفا
Annihilation radiation	اشعاع الاضمحلال
Atom mass	الكتلة الذرية

Atomic density	كثافة ذرية
Atomic mass mumber	العدد الكتلي الذري
Atomic weight	الوزن الذري
Attenuation coefficient	معامل التوهن (الأضعاف)
Avogadro's law	قانون أڤوغادرو
Barn	وحدة السطح
Beta decay	تفكك بيتا
Beta rays	أشعة بيتا
Binding energy	طاقة الرباط
Boiling-water-reactor	مفاعل الماء المغلي
Boundary conditions	الشروط الحدودية ([illegible])
Breeder reactor	مفاعل التوالد
Burn-out flux	تدفق الاحتراق
Capture γ-rays	أسر اشعة غاما
Cell	خلية
Chain reaction	تفاعل متسلسل
Charged particles	جسيمات مشحونة
Cluster control rods	جملة قضبان تحكم
Compound nucleus	نوى مركبة (وسيطة)
Compton absorption	امتصاص كانتون
Compton scattering	تبعثر كانتون
Containment	حاوي
Control rod	قضيب التحكم
Capture	أسر
Coversion	تبديل
Conversion factor	عامل التبديل
Converter reactor	مفاعل التبديل

Critical mass	الكتلة الحرجة
Griticality of reactor	حرجية المفاعل
Cross section	المقطع العرضاني
Decay scheme	مخطط التفكك
Delta function	تابع ديلتا
Deuteroium	ديتيريوم
Deuteron	ديتيرون
Diffusion of neutron	انتشار النيترونات
Diffusion coefficient	معامل الانتشار
Diffusion length	طول الانتشار
Diffusion time	زمن الانتشار
Distribution function	تابع التوزيع
Divergence	التفرق
Dollar	واحدة نووية
Doppler effect	مفعول دوبلر
Dose	جرعة
Effective energy	الطاقة الفعالة
Eigenvalue	القيمة الخاصة
Elastic scattering	الانتثار المرن
Auger electron	الكترون أوغر
Energy	طاقة
Enrichment	اغناء (اخصاب)
Excited state	الحالة المحرضة
Fast fission factor	عامل الانشطار السريع
Fast reactor	المفاعل السريع
Factor, multiplication	عامل التكاثر

Fertile isotopes	النظائر المخصبة
Fick's law	قانون فيكز
Fission fragments	شظايا انشطار
Fission neutrons	نيترونات الانشطار
Fission products	نتاجات الانشطار
Flux	تدفق
Four-factor formula	عبارة المعاملات الأربعة
Fuel	وقود
Fusion reactions	تفاعلات اندماجية
Gamma ray	اشعاع غاما
Gas-cooled fast reactor	مفاعل سريع مبرد بالغاز
Gas-cooled thermal reactor	مفاعل حراري مبرد بالغاز
Generation time	زمن الذرية
Gram atomic weight	الوزن الذري الغرامي
Gram molecular weight	الوزن الجزيئي الغرامي
Half-life	عمر النصف
Heavy water reactor	مفاعل الماء الثقيل
Heterogeneous reactor	مفاعل غير متجانس
High temperature gas-cooled reactor	مفاعل الحرارة العالية
Inelastic γ-rays	أشعة غاما اللا مرنة
Inelastic scattering	الانتثار اللا مرن
Intensity	شدة
Interaction of radiation with matter	فعل الاشعاع المتبادل
Light-water reactor	مفاعل الماء الخفيف
Linear doubling time	زمن التضاعف
Liquid metal fast breeder reactor	مفاعل التوالد السريع

Macroscopic cross-section	المقطع العرضاني العياني
Magic nuclei	النواة السحرية
Mass change with speed	تغير الكتلة بسبب السرعة
Mass absorption coefficient	معامل الامتصاص الكتلي
Mean diffusion time	زمن الانتشار الوسطي
Mean generation time	زمن التوالد الوسطي
Moderation of neutrons	تهدئة النيترونات
Moderator (temperature coefficient)	المهدىء
Molecular Weight	الوزن الجزيئي
Multiplication factor	عامل التكاثر
Nuclear reaction	التفاعل النووي
Nucleon	نوكليون
Nuclide	نوكليد
One-group method	طريقة الزمرة الوحيدة
Photoelectric effect	المفعول الفوتوني الكهربائي
Posisons	سموم
Potential scattering	الانتثار الكموني
Pressurized-water reactor	مفاعل الماء المضغوط
Pressurizer	حاوي الضغط
Prompt criticality	الحرجية الفورية
Prompt neutrons	النيترونات الفورية
Prompt jump	قفزة فورية
Proton	البروتون
Quality factor	عامل الجودة
γ - value	قيمة ـ غاما
Rad	واحدة اشعاع

Radiation	اشعاع
Radiation (shielding)	تحجيب ضد الاشعاع
Radiative Capture	الأسر الاشعاعي
Radioactivity	النشاط الاشعاعي
Range of particles	مدى الجسيمات
Reactivity	التفاعلية
Reflector	العاكس
Rem	واحدة اشعاع
Resonance	رنين
Resonance escape probability	احتمال الافلات الرنيني
Resonance integral	تكامل الرنين
Roentgen	رنتجن
Richter scale	سلم رختر
Scattering Compton	انتشار كانتون
Subcritical	تحت الحرج
Temperature coefficient	معامل الحرارة
Thermal neutrons	النيترونات الحرارية
Uranium	يورانيوم
Wavelength	طول الموجة
Overcritical	فوق الحرج

فهرس الكتاب

الفصل السادس :

الفصل السابع :

الفصل الثامن :

الفصل التاسع :

الفصل الثالث عشر :

الفصل الرابع عشر :

ملحق / 1 /

ملحق / 2 /

ملحق / 3 /

بِسْمِ اللهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيمِ

يَا مَعْشَرَ الْجِنِّ وَالإِنْسِ إِنِ اسْتَطَعْتُمْ أَنْ
تَنْفُذُوا مِنْ أَقْطَارِ السَّمٰوَاتِ وَالأَرْضِ فَانْفُذُوا
لَا تَنْفُذُونَ إِلَّا بِسُلْطَانٍ

صَدَقَ اللهُ العَظِيم

https://archive.org/details/@hassan_ibrahem

- الدكتور المهندس مطاوع الأشهب
- أستاذ الهندسة الكهربائية بجامعة دمشق



- حاز على درجة الإجازة في العلوم من جامعة السوربون في باريس عام 1952
- حاز على دبلوم في الإليكتروتكنيك وعلى درجة الدكتوراة في العلوم التقنية من معهد البوليتكنيك في زوريخ عام 1960
- حاز على درجة الدكتوراة في الرياضيات من جامعة زوريخ عام 1964
- عمل في أبحاث المفاعل النووي السويسري في فيرنلنغن
- عمل كباحث في مركز البحوث النووية في كارلزروهيه في المانيا

- قام بعدة زيارات علمية إلى كل من الولايات المتحدة - والسويد في مجال اختصاصاته النووية
- ألف كتاب هندسة التحكم الآلي لصالح جامعة دمشق وله حوالي عشر مقالات علمية منشورة في مجال الطاقة النووية
- من مواليد عام 1924 في القريّا - الجمهورية العربية السورية .



السعر 12 $ US أو ما يعادلها